

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Sarah Ivušić

ISPITIVANJE METODE PROGNOZE PIJAVICA
NA JADRANU NUMERIČKIM METEOROLOŠKIM
MODELOM VELIKE RAZLUČIVOSTI

Diplomski rad

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

SMJER: Meteorologija i fizička oceanografija

Sarah Ivušić

Diplomski rad

**Ispitivanje metode prognoze pijavica
na Jadranu numeričkim
meteorološkim modelom velike
razlučivosti**

Voditelj diplomskog rada: Doc. dr. sc. Maja Telišman Prtenjak

Suvoditelj: Tanja Renko, dipl. ing. fizike-geofizike

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2016.

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. sc. Maji Telišman Prtenjak i Tanji Renko, dipl. ing. fizike-geofizike. na ideji, iznimnom strpljenju i stručnim savjetima. Bez njihovog velikog truda i korisnih rasprava ovaj rad ne bi bio izvediv.

Zahvaljujem se dipl. ing. fizike-geofizike Igoru Horvatu na prevođenju i prilagodbi izvornog algoritma te na pomoći pri programiranju.

Zahvaljujem se dipl. ing. fizike-geofizike Vinku Šoljanu iz Hrvatske kontrole zračne plovidbe na pomoći pri programiranju i ustupljenim programima.

Posebno hvala mojoj majci na svoj pruženoj podršci, beskonačnom razumijevanju i vjeri u mene.

Zahvaljujem se nastavnom osoblju Geofizičkog odsjeka na prenesenom znanju. Hvala i svim mojim kolegama zbog kojih su mi studentski dani bili veseli i nezaboravni.

Također se zahvaljujem osoblju Državnog hidrometeorološkog zavoda na ustupljenim prizemnim mjerenjima i podacima o lokaciji i vremenu pojave pijavica.

Sažetak

U ovom radu napravljena je sinoptička i mezoskalna analiza te testirana je Szilagyi-eva metoda prognoze pojave pijavica na deset odabranih slučajeva pojave pijavica u razdoblju od 2013. do 2016. godine. Podaci o pojavi pijavica prikupljeni su s meteoroloških postaja, novinskih članaka, pomoću upitnika za javnost na internetskim stranicama Državnog hidrometeorološkog zavoda te zahvaljujući dojavama lokalnog stavnovništva. Sinoptičke situacije su opisane pomoću prizemnih i visinskih karata polja tlaka zraka, SYNOP podataka i radiosondažnih mjerenja. Svakom odabranom slučaju s pijavicama je pridjeljen sinoptički tip vremena analizom karata geopotencijala na 500 hPa plohi, a analizom podataka iz LINET sustava pijavice su klasificirane na one povezane s grmljavinskim nevremenom i one "lijepog vremena". Mezoskalne karakteristike (s fokusom na termodinamičke indekse) određivane su mezoskalnim modelom velike horizontalne razlučivosti (od 500 m) te se pritom model usporedio s dostupnim mjerenjima. Kako termodinamički indeksi nestabilnosti nisu dovoljni za prognozu pijavica, testirana je metoda prognoze Szilagyi-evim indeksom za pijavice (SWI) koristeći vertikalne profile iz mezoskalnog numeričkog modela. Dobivene vrijednosti SWI potvrđuju pojavu pijavica, čak i zimskih pijavica. Ovime se Szilagyi-eva metoda prognoze pijavica pokazala kao valjana prognostička metoda na Jadranu.

Ključne riječi: Szilagyi-ev indeks za pijavice, WRF, konvekcija

Study of waterspout forecasting method over the eastern Adriatic using a high resolution numerical weather model

Abstract

In this paper we have performed a synoptic and mesoscale analysis and tested Szilagyi's waterspout forecasting method on ten waterspout events in the period 2013-2016. Data about waterspout occurrences were collected from the weather stations, an online survey at the official Web site of the Croatian Meteorological and Hydrological Service and eyewitness reports from newspapers and the internet. Synoptic weather conditions were analyzed using surface pressure fields and 500 hPa level synoptic charts, SYNOP reports and atmospheric soundings. For all observed waterspout events a synoptic type was determined using 500 hPa geopotential height chart. The occurrence of lightning activity was determined from the LINET lightning database and waterspouts were divided into thunderstorm related and fair weather ones. Mesoscale characteristics (with focus on thermodynamic indices) were determined by using the high resolution (500 m) mesoscale numerical weather model and model results were compared with the available observations. Because thermodynamic instability indices are usually insufficient for forecasting waterspout activity, the performance of the Szilagyi Waterspout Index (SWI) was tested using vertical atmospheric profiles provided by the mesoscale numerical model. The SWI successfully forecasted all waterspout events, even the winter waterspout event. This indicates that the Szilagyi's waterspout prognostic method could be used as valid waterspout prognostic method for the Eastern Adriatic.

Key words: Szilagyi Waterspout Index, WRF, convection

Sadržaj

1	Uvod	1
1.1	Definicija pijavice i osnovna obilježja	2
1.2	Životni ciklus pijavice	3
1.3	Intenzitet pijavice	5
1.4	Termodinamički indeksi nestabilnosti atmosfere	6
1.5	Sinoptički tipovi vremena	8
1.6	Istraživanje pojave pijavica na Jadranu	9
1.7	Prognoza pijavica	10
1.7.1	Prognoza pomoću radara	10
1.7.2	Kuiper-ov i van der Haven-ov indeks za pijavice	11
1.7.3	Szilagyi-ev nomogram i indeks za pijavice	11
2	Motivacija i cilj istraživanja	14
3	Podaci i metoda	15
3.1	Podaci	15
3.1.1	LINET - međunarodna mreža postaja za detekciju munja u Europi	16
3.1.2	METAR podaci	17
3.1.3	Opće karakteristike i postavke WRF modela	17
3.1.4	SHARPPy	19
3.2	Metoda računa Szilagyi-evog indeksa za pijavice	20
4	Rezultati i diskusija	22
4.1	Analiza pijavica po sinoptičkim tipovima vremena	22
4.1.1	Sinoptički tip: Jugozapadno strujanje (SW)	22
4.1.2	Sinoptički tip: Dolina u obliku dugog vala (LW)	37
4.1.3	Sinoptički tip: Zatvorena visinska ciklona (CLOSED)	45
4.1.4	Sinoptički tip: Dolina u obliku kratkog vala (SWT)	54
4.2	Procjena maksimalnog intenziteta konvektivnog vrtloga pijavice	62
5	Zaključci	65
	Dodaci	68
A	Vrijednosti $EL-LCL$, $SST-T_{850}$ za D domenu te SWI za C i D domenu	68
B	Rezultati SHARPPy programa za sve slučajeve pojave pijavica	73
	Literatura	79

1 Uvod

U današnje vrijeme, kada je skoro svaka informacija dostupna u samo nekoliko sekundi, sve češće imamo priliku vidjeti natpise u novinama poput onog nedavnog iz 6. siječnja 2016. godine “Pijavica demolirala Split - srećom, zasad nema ozlijeđenih”. Tog dana iznimno jaka pijavica razvija se između Šolte i Splita, a u 15 h i 55 min ulazi s mora u sam grad Split (slika 1.1). Pijavica je prešla na sjevernu stranu Marjana kada je oslabila i potpuno se raspala. Na svom je putu iščupala desetke stabala, polomila nekoliko stupova javne rasvjete, par prometnih znakova te oštetila krov na obližnjoj osnovnoj školi. Iako su gotovo sve pijavice slabiji oblici tornada, procjena jakosti nekih pijavica po TORRO ljestvici (ljestvica za ocjenu jakosti tornada i pijavice, prikladna za tip izgradnje i naseljenosti u Europi) poistovjećuje te pijavice sa snažnim ili pak umjereno razornim tornadima. Unatoč krivoj interpretaciji novinara da je pojava pijavica, uzrokovana klimatskim promjenama, sve češća, jer su pijavice na Jadranu često opažane i u 18. stoljeću kada ih je Ruđer Bošković proučavao, činjenica ostaje da u današnje vrijeme rapidnog napretka tehnologije prognoza pojave pijavica još uvijek predstavlja veliki izazov i nosi mnoštvo otvorenih pitanja.



Slika 1.1. Pijavica 6. siječnja 2016. godine (gore, fotografirao Mate Pavić, motritelj Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) na glavnoj meteorološkoj postaji Split - Marjan) i šteta nastala prolaskom pijavice (dolje, izvor: <http://www.dalmacijanews.hr>).

1.1 Definicija pijavice i osnovna obilježja

Pijavice su atmosferski vrtlozi manjih dimenzija i kratkog trajanja, a pojavljuju se pri nestabilnoj atmosferi. Razlikujemo one nad čvrstim tlom (kopnene pijavice) i one nad vodenom površinom (vodene pijavice), odnosno one koje se pojavljuju nad morskom površinom (trombe marine).

Pijavicu prepoznamo kao vrtlog čija je gibljiva cijev ljevkastog oblika često nagnuta i uglavnom se proteže od podnice oblaka, najčešće kumulusnog roda s niskom bazom, do morske površine. Donji dio vrtloga, visine svega nekoliko metara, se sastoji od usisane morske vode, a gornji od kapljica nastalih kondenzacijom pri dizanju vlažnog zraka. Pijavice se mogu pojaviti u različitim oblicima i grupama tj. obitelji (engl. *waterspout family*) uslijed iste uzlazne struje (npr. Grotjahn, 2000). Kao i svi konvektivni vrtlozi pijavica ima toplu jezgru i nizak tlak. Prema Goldenu (1974a) vertikalne brzine unutar pijavice dosežu vrijednosti do 10 m/s u području maksimalne temperature, dok horizontalne tangencijalne brzine pri tlu mogu postići vrijednost do 80 m/s . Površinski dijametar pijavice ima raspon od 5 do 75 m , a poremećaji tlaka i temperature unutar pijavice variraju od 10 do 90 hPa i od 0.2 do 2.5 K . Porijeklo vrtložnosti pijavice je u lokalnom smicanju vjetra, stoga one rotiraju ciklonalno ili anticiklonalno (Schweisow, 1981).

Pijavicom se smatra svaki tornado nad vodenom površinom (Doswell, 2001). Prema Davies-Jones i sur. (2001) postoje dva tipa tornada:

a) Tornado koji nastaje kao dio mezociklone. Promjer mu je u prosjeku od 3 do 9 km , a može biti i dio superćelijskog olujnog oblaka. Vremensko trajanje je uglavnom veće od jednog sata. Neki rezultati istraživanja ukazuju da je geneza ovog tornada u vrhu olujnog oblaka.

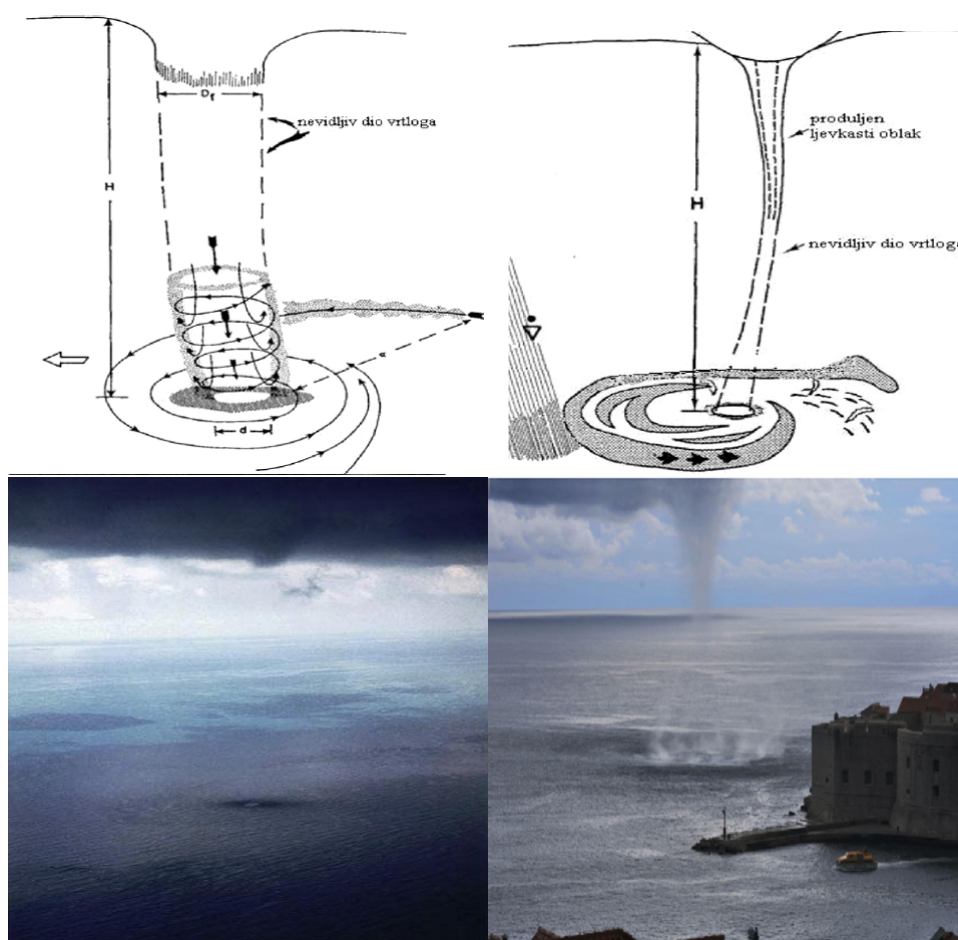
b) Tornado koji nije dio veće mezocirkulacije, već nastaje duž stacionarne ili slabo pokretne linije konvergencije. Uglavnom su to mali i razmjerno slabi vrtlozi koji prvo nastaju pri tlu i u interakciji s cumulonimbusom (Cb) i uzlaznim strujanjima mogu se protegnuti do podnice oblaka i formirati tornado.

Pijavice po nastanku dijelimo na dva osnovna tipa: pijavice “lijepog vremena” (engl. *fair-weather waterspouts*) i pijavice vezane uz grmljavinske oluje (engl. *thunderstorm related waterspouts*). Pijavice koje nastaju za jačih grmljavinskih oluja su dugotrajnije i većeg promjera. Ako se ovakva pijavica premjesti na kopno, može prouzročiti znatne štete uz obalu. Pijavice “lijepog vremena” uglavnom nastaju na otvorenom moru, obično su manje opasne jer su manjih dimenzija i brže zamiru (Sioutas i Keul, 2007). Prema najnovijim analizama podjednak je broj pijavica “lijepog vremena” i pijavica povezanih s grmljavinskim olujama na Jadranu (Renko i sur., 2016).

1.2 Životni ciklus pijavice

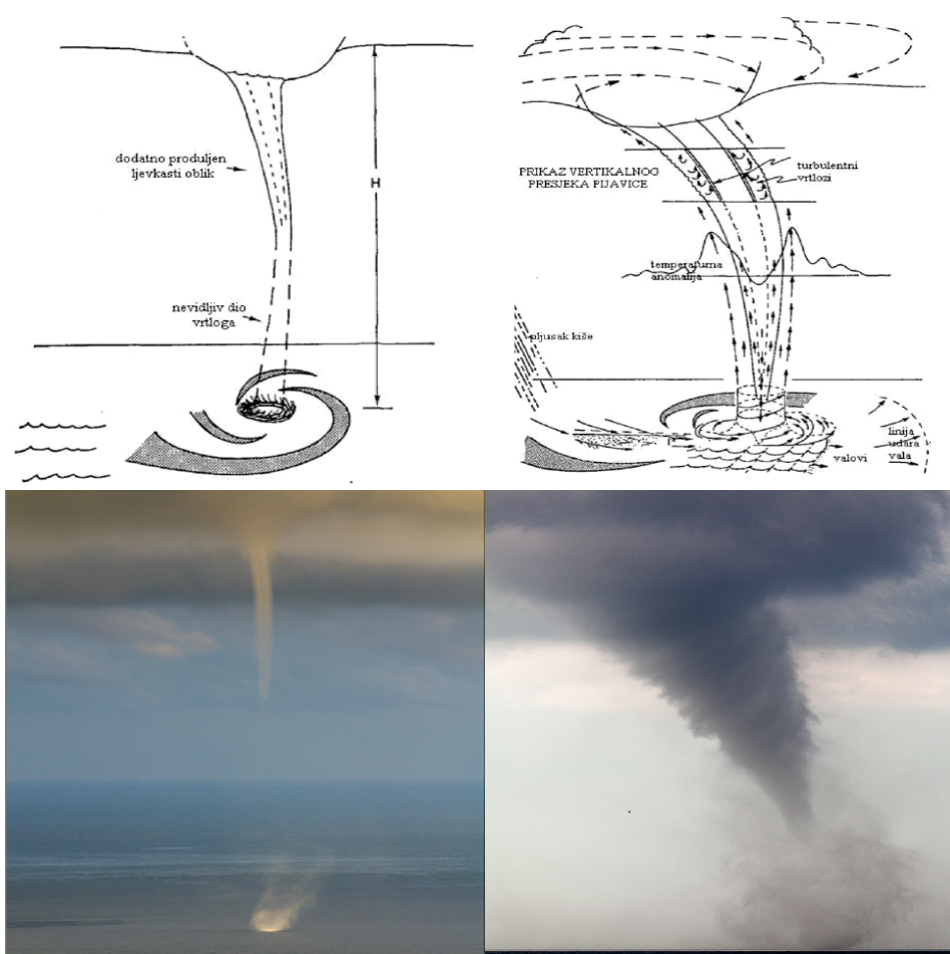
Prosječno trajanje pijavice može biti od 2-20 min, iako velike pijavice mogu trajati i duže od 1 h (Sioutas i Keul, 2007). Prema pionirskom radu Golden (1974a) pijavice tijekom formiranja prolaze kroz pet stadija koji se međusobno preklapaju:

1. Prvi stadij je *tamno mjesto* koje se očituje po svijetlom disku na površini vode, kojeg okružuje tamni prsten, difuzan na svojem vanjskom rubu. Tamno mjesto ne mora nužno na početku u visini imati vidljiv ljevčkasti oblak, ali već predstavlja kompletan vrtložni stup koji se proteže od podnice oblaka do površine mora. Ovaj stadij se uglavnom ne može uočiti s kopna.
2. Drugi stadij je stadij *spiralnog oblika* u kojem se pijavica oblikuje i pojačava. Karakterizira ga razvoj alternirajućih tamnijih i svjetlijih spiralnih pojaseva oko tamnog mjesta na morskoj površini. Također dolazi do spuštanja oblačnog lijevka.



Slika 1.2. Shematski prikaz (preuzeto iz Golden, 1974a) i fotografije (lijeva preuzeta iz North i sur. (2015), desnu snimio Daniel Pavlinović) prvog stadija (lijevo) i drugog stadija pijavice (desno).

3. U trećem stadiju nastaje *prsten raspršenih kapljica* oko tamnog mjesta. Lijevak iz oblaka je duži i širi nego u prethodnom stadiju. Spiralni oblik počinje slabiti, ali je još uvijek prisutan.
4. Četvrti stadij je stadij *zrelog razvoja pijavice* kojeg karakterizira vrtlog maksimalnog intenziteta i organiziranosti. Maksimalna organiziranost znači da oblačni lijevak doseže maksimalnu duljinu i radijus. Spiralni oblik postupno slabi.
5. Peti stadij je *stadij raspadanja*, kad pijavica često naglo nestaje pri pojavi hladnih silaznih struja iz obližnjeg pljuska što prekida utjecanje toplog zraka u pijavicu i daljnju konvekciju.



Slika 1.3. Shematski prikaz (preuzeto iz Golden, 1974a) i fotografije (snimio: Daniel Pavlinović) trećeg stadija (lijevo) i četvrtog stadija pijavice (desno).

Svaka pijavica ne prolazi kroz svih pet stadija razvoja. Prvi i četvrti stadij imaju najduže trajanje, a mnoge se pijavice raspadnu već nakon prvog stadija i ne razviju se u zreli oblik. Na slikama 1.2-1.4 su prikazani shematski modeli svakog od stadija kao i njihove fotografije. Na shematskim prikazima H predstavlja visinu podnice oblaka, D_f je maksimalni promjer ljevkastog oblaka i d je promjer tamnog mjesta.



Slika 1.4. Shematski prikaz (preuzeto iz Golden, 1974a) i fotografija (snimio: Daniel Pavlinović) petog stadija pijavice.

1.3 Intenzitet pijavice

Horizontalno strujanje pijavice može se aproksimirati ciklostrofičkim strujanjem. Ako je horizontalno strujanje dovoljno malih prostornih razmjera, Coriolisova sila može se zanemariti u odnosu na silu gradijenta tlaka i centrifugalnu silu koje su u ravnoteži (npr. Holton, 2004). Rezultat ove ravnoteže je strujanje duž zakrivljenih silnica u ciklonalnom ili anticiklonalnom smjeru, a u oba slučaja je sila gradijenta tlaka usmjerena prema centru vrtloga, a centrifugalna sila suprotno od nje. Ciklostrofičko strujanje može se prikazati u prirodnom koordinatnom sustavu:

$$\frac{v^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (1.1)$$

gdje je v horizontalna brzina strujanja, r je radijus zakrivljenosti strujnica, ρ je gustoća zraka, a $\partial p / \partial n$ je normalna komponenta sile gradijenta tlaka.

Kako bi dobili jednadžbu maksimalnog intenziteta vrtloga pijavice, odnosno maksimalnu horizontalnu brzinu Renno i Bluestein (2001) uvažavaju jednadžbu stanja idealnog plina, (1.1) i pretpostavku $\frac{\partial p}{\partial n} \sim \frac{\Delta p}{r}$. Slijedi da maksimalna horizontalna brzina vjetra ne ovisi o radijusu vrtloga pijavice već o razlici tlakova Δp na maksimalnoj udaljenosti na kojoj se osjeća utjecaj vrtloga i u samom središtu pijavice:

$$v_a \approx \sqrt{\frac{RT_\infty \Delta p}{p_\infty}} \quad (1.2)$$

gdje je v_a maksimalna horizontalna brzina na radijusu a od centra vrtloga, R je specifična plinska konstanta vlažnog zraka, T_∞ i p_∞ su temperatura i tlak okoline na maksimalnoj udaljenosti na kojoj se osjeća utjecaj vrtloga. Prema (1.2) potencijalni

maksimalni intenzitet pijavice ovisi samo o termodinamičkim svojstvima okoline u kojoj se ona nalazi, intenzitet je veći što je veća razlika tlaka, odnosno temperature i količine vodene pare, između zraka na radijusu utjecaja vrtloga i zraka u centru vrtloga. Ovo se može interpretirati kao razlika u temperaturi i količini vodene pare između toplih i vlažnih uzlaznih i hladnih i suših silaznih strujanja (Renno i Ingersoll, 1996). Stoga će se konvektivni vrtlozi najvjerojatnije formirati u području gdje je pojava ovakvih strujanja podržana od okoline, ovo objašnjava zašto se pijavice formiraju u blizini granice između relativno toplih i relativno hladnih voda (Golden, 1974b).

Nadalje, iz (1.2) se može vidjeti da maksimalna brzina ne ovisi eksplicitno o polju vrtložnosti u okolini pijavice. Međutim, radijus vrtloga pri maksimalnoj brzini vjetra upravo o tome ovisi. Jačanje polja vrtložnosti dovodi do porasta radijusa na kojem se bilježi maksimalna brzina vjetra. Pri tlu, gdje je trenje najjače, radijus pri maksimalnoj brzini je najmanji, a visinom raste kako utjecaj trenja slabi.

1.4 Termodinamički indeksi nestabilnosti atmosfere

U kratkoročnoj prognozi ocjena indeksa nestabilnosti atmosfere važna je za određivanje potencijala za razvoj i pojavu pijavica. Indeksi se dobivaju iz numeričkih prognostičkih modela ili na temelju radiosondažnih mjerenja. Slijedi kratki opis indeksa nestabilnosti koji se smatraju mogućim indikatorima pojave pijavica.

K indeks (KI) je mjera potencijala za razvoj grmljavinskog nevremena koja se temelji na vertikalnoj stopi promjene temperature, sadržaju vlage u nižoj troposferi i visini vlažnog sloja. Računa se iz sljedeće jednadžbe:

$$KI = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T - T_d)_{700} \quad (1.3)$$

gdje su T_{850} , T_{700} i T_{500} temperature zraka na visinama na kojima je tlak 850, 700 i 500 hPa, a T_{d850} i T_{d700} temperature rosišta na visinama na kojima je tlak 850 i 700 hPa.

Tablica 1. Vrijednosti KI (°C) za različite uvjete u atmosferi (vrijednosti vrijede za šire područje SAD, prema <http://www.srh.noaa.gov/ffc/?n=gloss2>).

$KI < 30$	moгуće grmljavinske oluje
$30 < KI < 40$	veća vjerojatnost pojave grmljavinskih oluja
$KI > 40$	vrlo velika vjerojatnost pojave grmljavinskih oluja

Što je veći postotak vlage u zraku te što je veća razlika temperatura zraka na 850 i 500 hPa, to je vrijednost KI veća, a samim tim je veća mogućnost za pojavu konvekcije. Može se dogoditi da je zrak na visini plohe od 700 hPa suh, odnosno razlika

temperature zraka i temperature rosišta na 700 hPa može dati mali KI, a istovremeno uvjeti u nižim slojevima mogu biti povoljni za razvoj grmljavinskog nevremena.

Nešto pouzdaniji indikator grmljavinskog nevremena je Total Totals indeks (TT). Uzima u obzir statičku stabilnost i vlažnost zraka na visini na kojoj je tlak zraka 850 hPa, no on kao i KI postaje nereprezentativan ako se sva vlaga nalazi ispod plohe od 850 hPa. Računa se pomoću sljedeće jednadžbe:

$$TT = T_{850} + T_{d850} - 2T_{500} \quad (1.4)$$

gdje su T_{850} i T_{500} temperature zraka i rosišta na visinama na kojima je tlak 850 i 500 hPa, a T_{d850} je temperatura rosišta na visini na kojoj je tlak 850 hPa.

Tablica 2. Vrijednosti Total Totals indeksa za različite uvjete u atmosferi (vrijednosti vrijede za šire područje SAD, prema <http://www.srh.noaa.gov/ffc/?n=gloss2>).

$TT < 44$	ne očekuje se nevrijeme
$45 < TT < 50$	slab potencijal za jake oluje
$51 < TT < 55$	umjeren potencijal za jake oluje
$TT > 55$	veliki potencijal za jake oluje

Konvektivna raspoloživa potencijalna energija (engl. *Convective Available Potential Energy*, CAPE) je maksimalna moguća raspoloživa količina konvektivne energije koja je česti na raspolaganju za vertikalno akceleriranje zbog uzgona. CAPE je direktna mjera termalne nestabilnosti i ovisi o toplini česti u odnosu na okolni zrak. Koristi se prilikom procjene područja u kojima se može očekivati oluja, tornado ili pijavica itd. CAPE se može izračunati iz:

$$CAPE = g \int_{z_{LFC}}^{z_{EL}} \frac{T_{vp} - T_{ve}}{T_{ve}} dz \quad (1.5)$$

gdje je g ubrzanje sile teže, z_{LFC} visina razine slobodne konvekcije (engl. *Level of Free Convection*, LFC), z_{EL} visina razine neutralnog uzgona (engl. *Equilibrium Level*, EL), a T_{vp} i T_{ve} su virtualne temperature česti i okolnog zraka.

Tablica 3. Vrijednosti CAPE-a ($J \text{ kg}^{-1}$) za različite uvjete u atmosferi (vrijednosti vrijede za šire područje SAD, prema <http://www.srh.noaa.gov/ffc/?n=gloss2>).

$CAPE < 0$	stabilno
$0 < CAPE < 1000$	nestabilno
$1000 < CAPE < 2500$	umjereno nestabilno
$2500 < CAPE < 3500$	jako nestabilno
$CAPE > 3500$	ekstremno nestabilno

Topao i vlažan zrak ima velike vrijednosti CAPE-a. Velika vlažnost implicira veliku količinu energije koja se oslobađa tijekom kondenzacije. Dotokom hladnog zraka u

visini povećava se vertikalni temperaturni gradijent, a time se povećava i vrijednost CAPE-a.

Energija inhibicije konvekcije (engl. *Convective Inhibition*, CIN) predstavlja energiju koja je potrebna da se čest zraka adijabatski podigne uvis iz početnog položaja do razine slobodne konvekcije. Ako je energija inhibicije konvekcije velika, neće doći do razvoja duboke konvekcije unatoč tome što drugi uvjeti mogu biti vrlo povoljni za razvoj konvekcije. Energija inhibicije konvekcije može se prikazati izrazom:

$$CIN = - \int_{p_A}^{p_C} R_d (T_{vp} - T_{ve}) d(\ln p) \quad (1.6)$$

gdje je p_A tlak u početnom položaju česti, p_C je tlak na razini slobodne konvekcije, T_{vp} i T_{ve} su virtualne temperature česti i okolnog zraka, a R_d je specifična plinska konstanta za suhi zrak.

Nedostatak kod navedenih indeksa je taj da ne uzimaju u obzir smicanje vjetra, što je ključan faktor u razvoju konvekcije, također nužan, ali ne dovoljan uvjet za stvaranje pijavice, koja se formira u području horizontalnog smicanja vjetra između uzlaznih i silaznih strujanja (npr. Renno i Bluestein, 2001).

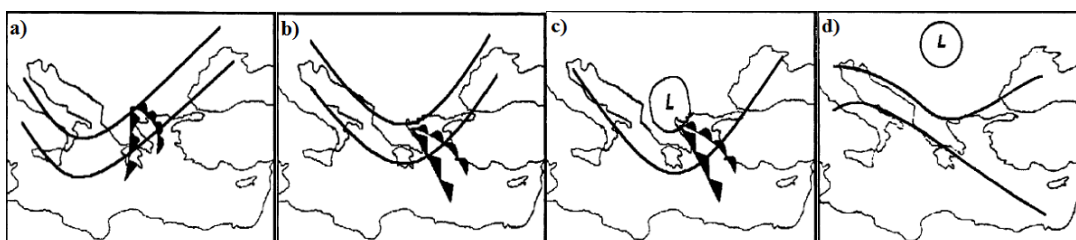
Nakon analize termodinamičkih uvjeta okoline, Keul i sur. (2009) su zaključili da su KI i TT indeksi dobri indikatori pojave pijavica, dok su vrijednosti za CAPE bile vrlo različite. Kako se pijavice ne razvijaju samo u uvjetima grmljavinskog nevremena, već i za "lijepog vremena", termodinamički indeksi nestabilnosti nisu dovoljni za prognozu. Ove indekse je potrebno promatrati zajedno sa sinoptičkom i mezoskalnom situacijom, te lokalnim stanjem atmosfere u području gdje se pijavice pojavljuju. Identifikacija sinoptičkih uvjeta koji su odgovorni za razvoj pijavice je važan korak u poboljšanju prognoze ovog fenomena.

1.5 Sinoptički tipovi vremena

Prepoznavanje sinoptičkih tipova vremena nad nekim područjem jednostavan je prvi korak u procjeni postojanja uvjeta za nastanak odnosno razvoj pijavice. Sioutas i Keul (2007) prepoznaju četiri sinoptička tipa koja prethode pijavicama (slika 1.5). Pri klasifikaciji se koriste karte geopotencijala na 500 hPa na kojima se određuju položaji osi grebena i dolina u odnosu na područje od interesa na površini. Četiri sinoptička tipa su: jugozapadno strujanje (engl. *southwest flow*, SW), dolina u obliku dugog vala (engl. *long-wave trough*, LW), zatvoreno središte niskog tlaka (engl. *closed low*, CLOSED) i dolina u obliku kratkog vala (engl. *short-wave trough*, SWT).

SW pretpostavlja dolinu u obliku dugog vala zapadno od područja interesa i greben u obliku dugog vala istočno-sjeveroistočno od istog područja. Pritom je obično prizemno prisutna ciklona s frontama usmjerenim od jugozapada prema sjeverois-

toku. U ovakvoj situaciji prizemno dolazi do jugozapadnog strujanja s dodatnim dolinama i grebenima u obliku kratkog vala u polju tlaka. Sinoptički tip LW uključuje dolinu u obliku dugog vala koja se sporo premješta preko područja interesa, prisutna je umjereno nestabilna zračna masa i visinsko strujanje zapadnog-sjeverozapadnog smjera. Također, baroklina granica se nalazi istočno ili jugoistočno od promatranog područja zajedno sa prizemnom ciklonom i frontalnom zonom. Karakteristika sinoptičkog tipa CLOSED je zatvorena izolinija geopotencijala na 500 hPa plohi iznad područja interesa, ujedno CLOSED tip predstavlja na neki način razvijeni oblik prethodnog LW tipa. Pri tlu središte ciklone nalazimo ispod visinskog središta (duboka ciklona). Sinoptički tip SWT karakterizira dolina u obliku kratkog vala koja se brzo premješta preko promatranog područja. Ova dolina ponekad može biti povezana s ciklonom sjeverno od promatranog područja.



Slika 1.5. Shematski prikaz sinoptičkih tipova vremena koji prethode pojavi pijavica: a) SW, b) LW, c) CLOSED i d) SWT (preuzeto iz Sioutas i Flocas, 2003).

Osim navedena četiri sinoptička tipa, uočeno je da se pijavice na Jadranu mogu formirati i pod utjecajem bezgradijentnog polja geopotencijala po visini (engl. *non-gradient pressure field, NG*) (npr. Kuzmić, 2012).

Prema Renko i sur. (2016) pijavice na Jadranu se najčešće pojavljuju pri SW sinoptičkom tipu (57 %), sljedeći je CLOSED tip (22 %), zatim SWT (17 %), nakon toga LW (13 %) i NG (5 %).

1.6 Istraživanje pojave pijavica na Jadranu

Ruđer Bošković davne 1749. godine predstavlja jedan od prvih radova na temu pijavica na Jadranu. U svojoj meteorološkoj raspravi *Sopra il turbine che la notte tra gli XI, e XII Giugno del MDCCXLIX daneggiò una gran parte di Roma dissertazione* (Disertacija o oluji u noći između 11. i 12 lipnja 1749. godine koja je oštetila veliki dio Rima) Bošković navodi da su pijavice na Jadranu jako česte te je u svom radu opisao čak 13 pijavica. U nizu prikaza pojave pijavica ističe se detaljan opis Bacha (1987) koji je pred Dubrovnikom 13. listopada 1987. godine u razdoblju od dvadesetak minuta pratio čak 14 pijavica.

Unatoč ranim radovima na temu pijavica na Jadranu tek su nedavna istraživanja dala veći doprinos njihovom poznavanju. Poje (2004) daje pregled terminologije

vezane uz pojavu pijavica kao i osnovna objašnjena o tim pojavama. Pokazuje da se pijavice na Jadranu mogu pojaviti tijekom cijele godine, a vjerojatnost im je najveća u jesen, osobito u listopadu i studenom, a najveći broj pijavica traje između 11 i 20 minuta (40 %). Također, ukazuje na važnost entuzijazma i temeljitosti motritelja pri opažanju pijavica.

Ivančan Picek i Jurčec (2005) daju popis pijavica na Jadranu u razdoblju 2000. - 2003. godine prema novinskim izvješćima. Kao nedostatak podataka dobivenih motrenjem pojave navode činjenicu da se većina podataka zasniva na počinjenim štetama. Ističu potrebu praćenja pijavica radarima te važnost njihovog proučavanja, gdje ta proučavanja nužno zahtijevaju teorijska razmatranja i numeričko modeliranje.

Sioutas i Keul (2007) napravili su pregled pojave pijavica na srednjem i istočnom Sredozemlju, odnosno na Jadranskom, Jonskom i Egejskom moru. Primjećuju da se pijavice uglavnom pojavljuju od proljeća do jeseni, kada hladne zračne mase dolaze nad relativno topao i vlažan prizemni sloj zraka i/ili se gibaju nad toplom površinom mora. Zaključili su da je najveći broj pijavica na Jadranu zabilježen u srpnju, kolovozu i rujnu, a od 28 dana s pojavom pijavice, na Jadranu njih 7 je povezano s olujnim nevremenom i 9 ih je zabilježeno za "lijepog vremena", dok su najčešći sinoptički tipovi bili LW i CLOSED.

Giaiotti i sur. (2007) su na temelju desetogodišnjeg niza podataka (1991. - 2000.) napravili klimatologiju tornada i pijavica u Italiji. Pokazali su da se tornada i pijavice najčešće javljaju nad ravnim terenom i to uglavnom krajem ljeta i početkom jeseni, kada na sinoptičkoj skali dolazi do jače interakcije između Alpa i Sredozemlja.

1.7 Prognoza pijavica

Postoji nekoliko metoda prognoze pijavica, no s obzirom na raznolikost uvjeta u kojima nastaju, prognoza pijavica nastavlja predstavljati veliki izazov prognostičarima diljem svijeta.

1.7.1 Prognoza pomoću radara

Spratt i Choy (1994) predstavili su metodu prognoze pijavica na obali Floride pomoću WSR-88D radara (engl. *Weather Surveillance Radar - 88 Doppler*), koji za razliku od konvencionalnih radara nudi prognostičaru veći raspon radarskih produkata koji omogućuju promatranje atmosferskih pojava manje prostorne i vremenske skale. Prvo je potrebno odrediti jesu li sinoptička i mezoskalna situacija povoljne za razvoj pijavica. Ako su uvjeti povoljni, tada se koriste određeni produkti radara kojima se prepoznaju konvektivne ćelije iz kojih bi se mogla razviti pijavica. Nakon toga se izdaju upozorenja o mogućoj pojavi pijavice na određenom području.

1.7.2 Kuiper-ov i van der Haven-ov indeks za pijavice

Kuiper-ov i van der Haven-ov indeks za pijavice (engl. *Kuiper and van der Haven Spout Index*, KHS) razvijen je na meteorološkom zavodu Nizozemske (engl. *Royal Netherlands Meteorological Institute*, KNMI) te služi za određivanje vjerojatnosti pojave pijavica. Za izračun KHS indeksa koriste se četiri meteorološka parametra: iznos smicanja vjetra od 0 do 3 km, stopa ohlađivanja od 0 do 500 m, relativna vlažnost do 1 km visine i brzina vjetra na 10 m (Kuiper i van der Haven, 2007). Račun ovog indeksa je implementiran u High Resolution Limited Area Model (HIRLAM) koji se četiri puta dnevno pokreće na KNMI za prognozu u sljedećih 48 h. Prvi rezultati prognoze KHS indeksa za srpanj 2007. godine, mjesec sa 68 viđenih pijavica u Nizozemskoj, izgledaju povoljno.

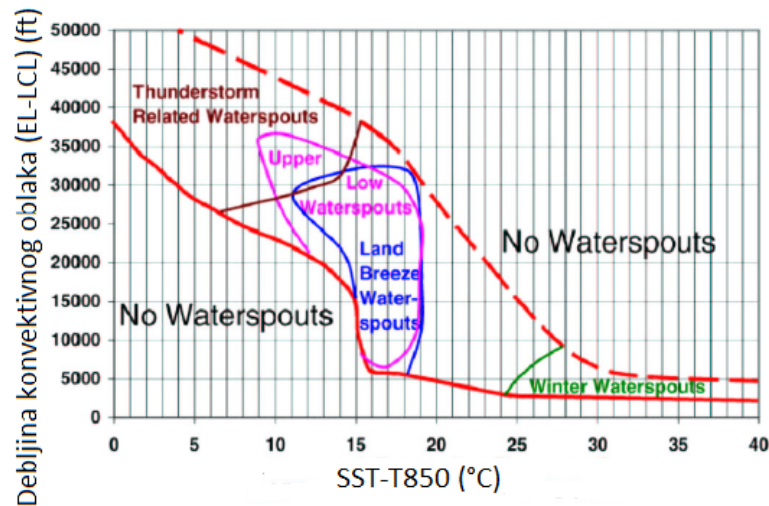
Renko i sur. (2011) testirali su KHS indeks za pijavice na Jadranu 2010. godine. KHS indeks je prognozirao 13 od 19 pijavica.

1.7.3 Szilagyi-ev nomogram i indeks za pijavice

Szilagyi-ev nomogram za pijavice (engl. *Szilagyi Waterspout Nomogram*, SWN) je empirijska metoda prognoze pijavica, prvotno razvijena za prognozu pijavica na Velikim jezerima u Sjevernoj Americi (Szilagyi, 2009). Szilagyi 1994. godine počinje intenzivno istraživanje o pojavi pijavica na ovom lokalitetu, a to uključuje skupljanje što većeg broja podataka o pojavi pijavica. Tako je ova metoda razvijena na uzorku od 172 događaja pijavica, koja uključuju 824 individualne pijavice tijekom više od 21 godine. Sljedeći korak bio je pronaći koji meteorološki parametri najbolje koreliraju s pojavom pijavica, od 14 mogućih, Szilagyi izdvaja dva parametra nestabilnosti i jedan ograničavajući uvjet na vjetar. Parametri nestabilnosti su:

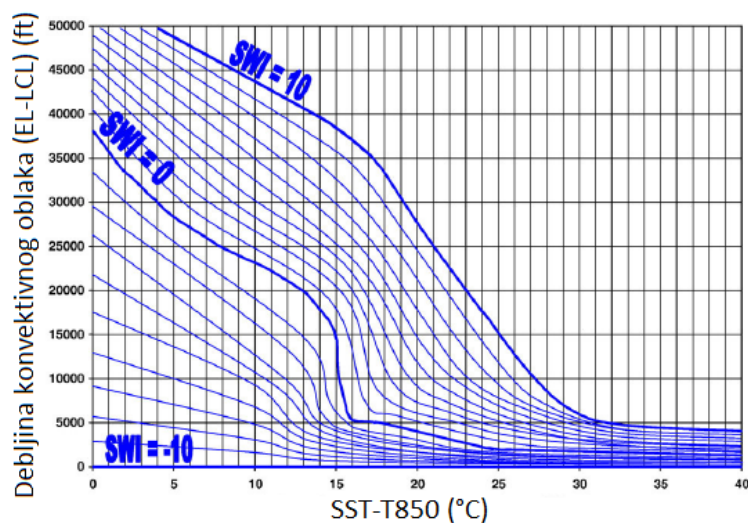
- razlika između temperature vodene površine i zraka na izobarnoj plohi 850 hPa (ΔT)
- razlika između visine ravnotežnog nivoa (engl. *Equilibrium Level*, *EL*) i visine nivoa kondenzacije česti (engl. *Lifting Condensation Level*, *LCL*) tj. dubina konvektivne naoblake (engl. *Convective Cloud Depth*) (ΔZ).

Ograničavajući uvjet na vjetar uključuje iznos brzine vjetra na 850 hPa plohi ($W_{850} \leq 20$ m/s) te predstavlja mjeru smicanja vjetra u najnižem sloju atmosfere u prvoj aproksimaciji (npr. Keul i sur., 2009). Dobivene vrijednosti parametara nestabilnosti su grafički prikazane (slika 1.6), zatim su gotovo sve točke na grafu obuhvaćene s dvije krivulje, donjom i gornjom granicom, nazvane “graničnim linijama pijavica” (engl. *waterspout threshold lines*). Uvjeti povoljni za nastanak pijavica nalaze se unutar ovih graničnih linija, a ukoliko su vrijednosti parametara izvan graničnih linija tog područja, nije vjerojatno da će doći do pojave pijavica. Dodatno je napravljena klasifikacija pijavica jer je primjećeno da pojedini “tipovi pijavica” zauzimaju jedinstveno područje na nomogramu (slika 1.6).



Slika 1.6. Szilagyi-ev nomogram za pijavice (preuzeto iz Szilagyi, 2005). Crvenom punom linijom označena je donja, a crvenom isprekidanom linijom označena je gornja "granična linija". Izvan tog područja pijavice se neće pojaviti. Unutar "graničnih linija pijavice" označena su područja ovisno o "tipu pijavice" koji se javlja za odgovarajuće vrijednosti parametara EL-LCL i $SST-T_{850}$.

Szilagyi-ev indeks za pijavice (engl. *Szilagyi Waterspout Index*, SWI) je indeks stabilnosti koji se koristi za procjenu vjerojatnosti razvoja pijavice (slika 1.7). SWI je dobiven direktno iz nomograma i funkcija je samo dva parametra: ΔT i ΔZ . Vrijednosti indeksa se kreću od -10 do 10, a pijavice se pojavljuju ako je njegov iznos veći ili jednak nuli. Granične linije nomograma koincidiraju s vrijednostima indeksa 0 i 10. Što je veća vrijednost SWI, to je veća vjerojatnost pojave pijavica. Koristeći samo vrijednosti SWI i W_{850} , mogu se razviti računalni programi za svakodnevno prognoziranje pijavica. SWN u operativne svrhe danas koriste *Meteorological Service of Canada* i *American Weather Service* (NOAA).



Slika 1.7. Szilagyi-ev indeks za pijavice (preuzeto iz Szilagyi, 2009). Linije povezuju točke istih vrijednosti SWI.

Keul i sur. (2009) primjenjuju SWN metodu prognoze za pijavice nad Jadranskim, Jonskim i Egejskim morem u periodu 2002.-2006. godine. Rezultati testiranja metode su pokazali da je 94 % od ukupnog broja pijavica uspješno prognozirano, za Jadran je ovaj postotak nešto veći (96 %). Također, analiza je pokazala da je u većini slučajeva pojava pijavica povezana s velikim vrijednostima $\Delta Z (>8500\text{ m})$ i relativno malim vrijednostima $\Delta T (<16\text{ }^{\circ}\text{C})$. Ovo implicira da su dinamički procesi dominantniji mehanizam pri razvoju pijavica u usporedbi s termičkim procesima. Srednja vrijednost SWI za sve pijavice u tom periodu iznosi 6, a za pijavice na Jadranu je neznatno veća (SWI=6.5). Ovo sugerira da se Szilagyi-ev nomogram za pijavice, kao i Szilagyi-ev indeks, može koristiti kao valjan prognostički alat za Jadransko, Egejsko i Jonsko more.

Potaknuti uspjehom Szilagyi-eve metode prognoze, Renko i sur. (2012) testirali su je na pijavicama koje su se pojavile na Jadranu 2010. godine i pri tome su koristili podatke dobivene ALADIN modelom. Rezultati su pokazali da je SWN metoda uspješno prognozirala 15 slučajeva pijavica od ukupno 19 (78.9 %).

2 Motivacija i cilj istraživanja

Istraživanje meteoroloških fenomena koji se javljaju u priobalju, a mogu nanijeti znatnu štetu zajednici i imovini, od velike su važnosti u pomorstvu, te u zadnje vrijeme rastućem turizmu na Jadranskoj obali. Pijavice su upravo jedan od tih meteoroloških fenomena. Ogromne štete, koje su ponekad praćene i gubitkom ljudskih života, u svakom slučaju ukazuju na potrebu boljeg poznavanja prirode pijavica, njihovo sustavno praćenje i prognozu. Zahvaljujući tehnologiji i internetu broj opaženih pijavica sve više raste iz godine u godinu, a potrebno je primjetiti da su gotovo sva opažanja pijavica prijavljena s obalnih područja i otoka, a vrlo malo s otvorenog mora. Slike 1.1 iz uvoda dovoljno pokazuju koliko je prognoza ovog meteorološkog fenomena od velike važnosti za sigurnost duž cijele obale Jadrana. Ujedno treba naglasiti da prema dostupnoj klimatologiji pijavica, Jadran spada u područje s vrlo velikom učestalošću formiranja pijavica na Sredozemlju (Keul i sur., 2009; Renko i sur., 2016).

U prethodnom poglavlju navedene su metode prognoze pojave pijavica. Radari koji bi pokrili cijelu Jadransku obalu nisu dostupni. Prognoza pomoću termodinamičkih indeksa nestabilnosti bi pokrila samo jednu polovinu slučajeva pojave pijavica, jer je podjednak broj pijavica na Jadranu koje se javljaju za "lijepog vremena" i onih povezanih s grmljavinskim olujama. Preostala je Szilagyi-eva metoda prognoze pijavica pomoću SWN i SWI. Pokazala se kao valjana prognostička metoda na Jonskom, Egejskom i Jadranskom moru, gdje je prognozirala pojavu 94 % pijavica koje su opažene od 2002. do 2006. godine (Keul i sur., 2009). Također, od 19 pijavica opaženih 2010. godine na Jadranu prognozira njih 15 (Renko i sur., 2012).

Ohrabreni prethodno opisanim rezultatima i motivirani nedavnim opažanjima pijavica, koje su nerijetko prelaskom na obalu uzrokovale, na sreću, samo materijalnu štetu, nastavljamo istraživanje sinoptičkih i mezoskalnih uvjeta koji favoriziraju razvoj pijavica, te radimo daljnja testiranja Szilagyi-eve metode prognoziranja. Glavni cilj ovog rada je određivanje sinoptičkih uvjeta koji prethode razvoju pijavica, izračun termodinamičkih parametara i testiranje Szilagyi indeksa za pijavice koristeći model velike prostorne i vremenske razlučivosti.

3 Podaci i metoda

3.1 Podaci

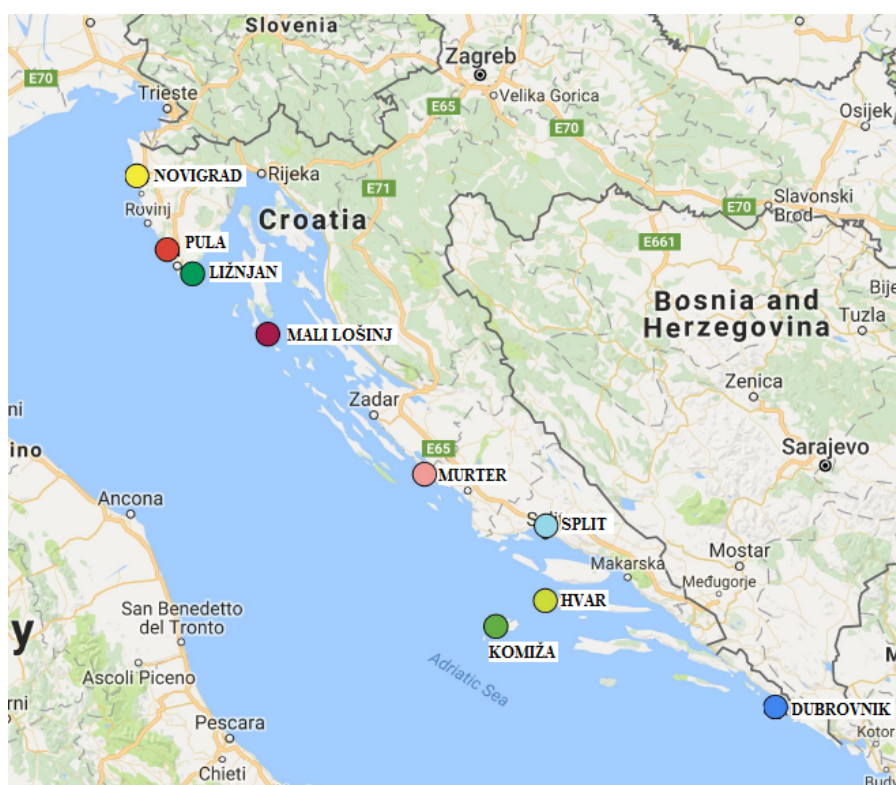
U ovom radu napravljena je sinoptička analiza i testirana je metoda prognoze pojave pijavica na hrvatskoj obali Jadrana za 10 odabranih slučajeva pojave pijavica u razdoblju 2013.-2016. godine. Podaci o pojavi pijavica prikupljeni su s meteoroloških postaja, novinskih članaka, izvještaja o štetama koje su pijavice izazvale premještanjem na kopno, pomoću upitnika za javnost "Jeste li vidjeli pijavicu/tornado? Obavijestite nas!" na internetskim stranicama DHMZ-a te zahvaljujući dojavama lokalnog stanovništva i zaljubljenika u ovu pojavu. U tablici 4 dan je pregled odabranih slučajeva pojave pijavica, a na slici 3.1 istaknute su lokacije s kojih su pijavice opažene. Iako su slučajevi odabrani proizvoljno, zanimljivo je primjetiti da je pojava pijavica u skladu s najtipičnijim vremenima opažanja koje su istaknuli Sioutas i Keul (2007) te Renko i sur., (2016); od 06 do 10 UTC i oko 14 UTC.

Tablica 4. Datum, vrijeme, lokacija, geografske koordinate, prisutnost atmosferskog električnog pražnjenja i sinoptički tip za odabrane slučajeve pojave pijavica.

Datum	Vrijeme (UTC)	Lokacija	Geo. širina (°)	Geo. duljina (°)	Munje	Sinoptički tip
28.08.2013.	08:00	Dubrovnik	42.64	18.08	ne	SW
28.08.2013.	08:00	Pula	44.84	13.80	da	SW
30.06.2014.	08:00	Novigrad	45.32	13.55	da	LW
15.08.2014.	10:15	Ližnjan	44.79	13.98	da	SW
24.09.2015.	07:00	Hvar	43.17	16.41	da	CLOSED
25.09.2015.	12:30	Dubrovnik	42.64	18.08	da	CLOSED
06.01.2016.	14:50	Split	43.51	16.44	da	SW
13.01.2016.	08:30	Murter	43.81	15.58	da	SWT
14.01.2016.	09:15	Komiža	43.03	15.95	ne	LW
11.02.2016.	13:00	Mali Lošinj	44.53	14.40	ne	SWT

Gore navedeni slučajevi su pri analizi grupirani s obzirom na sinoptički tip vremena koji je prethodio pojavi pijavice u skladu s klasifikacijom koju su koristili Sioutas i Keul (2007). Iz svake grupe odabran je po jedan ili po dva slučaja, ukoliko se jedan javio u toplom, a drugi u hladnom dijelu godine, koji su detaljno razrađeni. Dok su ostali slučajevi iz grupe istaknuti po svojim specifičnostima i razlikama u odnosu na predstavnike grupe. Pa je tako za predstavnike pojedinih grupa napravljena analiza prizemnih sinoptičkih karata, karata geopotencijala na 500 hPa plohi, karata polja vjetera i relativne vrtložnosti na 300 hPa plohi, a u tu svrhu korištene su sinoptičke karte njemačke meteorološke službe DWD (*Europaischer Wetterbericht - Deutscher Wetterdienst*) i sinoptičke karte s internetske stranice <http://www.wetter3.de> koje su dostupne u sinoptičkim terminima 00 UTC, 06 UTC, 12 UTC i 18 UTC. Upotrijebljene su sinoptičke karte u terminima neposredno prije pojave pijavica. U analizi su još korišteni prizemni podaci mjerenja s meteoroloških postaja (engl. *surface synoptic observations*, SYNOP), radiosondažna mjerenja preuzeta sa stranice

Sveučilišta u Wyoming-u, SAD (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>), a prisutnost atmosferskog električnog pražnjenja je provjerena pomoću podataka dobivenih iz sustava za lociranje munja (engl. *Lightning Location System* - LLS) koji je dio LINET sustava (Betz i sur., 2009). Navedeni podaci korišteni su za analizu sinoptičke situacije koja je prethodila pojavi pijavice i za pridjeljivanje sinoptičkog tipa danima s pojavom pijavice. Radiosondažna mjerenja su na većini postaja dostupna dva puta dnevno (00 UTC i 12 UTC). Smatra se da su sinoptički uvjeti dobro opisani radiosondažom unutar radijusa od 300 km (npr. Sioutas i Keul, 2007), međutim kako su pijavice malih vremenskih i prostornih dimenzija, dostupnost radiosondažnih podataka dva puta dnevno s postaje udaljene nekoliko desetaka kilometara nije dovoljna da bi se pouzdano opisali termodinamički uvjeti, a time nije ni dovoljna za pouzdanu prognozu pijavica. Iz ovih razloga preporuča se koristiti model velike prostorne i vremenske razlučivosti.



Slika 3.1. Karta Jadranskog mora s označenim lokacijama s kojih su uočene pijavice navedene u tablici 4.

3.1.1 LINET - međunarodna mreža postaja za detekciju munja u Europi

Podaci o munjama, potrebni pri kategorizaciji pijavica na one povezane s grmljavin-skim nevremenom i one koje to nisu, dobiveni su iz LINET sustava za lociranje munja (Betz i sur., 2009). Ovaj sustav razvijen je na Sveučilištu u Münchenu i omogućava detektiranje munja na gotovo cijelom području Europe i daje kontinuirani niz podataka za istraživačke i operativne svrhe od 01.05.2006. godine. LINET sustav pokriva

područje od oko 30°-65°N geografske širine te od oko 10°W-35°E geografske duljine i uključuje preko 100 senzora u 24 zemlje. Osjetljivost senzora smanjuje se kako se povećava udaljenost udara munje od LINET senzora, stoga se preporuča udaljenost između senzora ne veća od 200 km. Sustav omogućava detekciju atmosferskog pražnjenja između oblaka i tla, pražnjenja unutar samog oblaka, kao i atmosferskog pražnjenja između oblaka. U Hrvatskoj je postavljeno šest senzora LINET sustava, a Hrvatska ima pristup podacima iz LINET mreže od 2010. godine.

3.1.2 METAR podaci

METAR je oblik kodiranog meteorološkog izvješća, točnije to je redoviti vremenski izvještaj za zrakoplovstvo (fr. *MÉTéorologique Aviation Régulière*). Koriste ga piloti u sklopu priprema za let i meteorolozi kao dodatnu informaciju pri prognozi vremena. Sirovi METAR izvještaj je format koji se najčešće koristi u svijetu pri prijenosu izmjerenih meteoroloških podataka, a standardiziran je od strane Međunarodne udruge za civilno zrakoplovstvo (engl. *International Civil Aviation Organization*, ICAO) i Svjetske meteorološke organizacije (engl. *World Meteorological Organization*, WMO).

METAR izvještaji se najčešće šalju sa zračnih luka ili s automatskih meteoroloških postaja svakih 1/2 ili 1 h, no ako se vremenski uvjeti značajnije mijenjaju šalje se specijalno izvješće (SPECI). Tipični METAR izvještaj sadrži podatke o temperaturi zraka, temperaturi rosišta, smjeru i brzini vjetra, oborini, vidljivosti, tlaku zraka te vrsti i visini naoblake. Također, METAR može sadržavati podatak o količini oborine, pojavi grmljavine te ostale informacije koje su od značaja za pilote ili meteorologe.

3.1.3 Opće karakteristike i postavke WRF modela

Za analizu termodinamičkih i kinematičkih parametara nestabilnosti te Szilagyi indeksa za pijavice korišten je mezoskalni numerički model WRF (engl. *Weather Research and Forecasting*) koji se koristi za istraživanje i za prognozu vremena. Do sada je WRF model primijenjen i testiran u brojnim analizama za šire područje Jadrana; za analizu konvekcije i mezoskalnog strujanja (npr. Telišman Prtenjak i sur., 2010; Belušić i sur., 2013; Poljak i sur., 2014; Kuzmić i sur., 2015).

Model se sastoji od trodimenzionalnih (3D) prognostičkih jednadžbi u Eulerovom sustavu za potpuno stlačiv fluid (Skamarock i sur., 2008) u nehidrostatičkoj formi. Jednadžbe su primijenjene na termodinamičke varijable u perturbacijskom obliku i to na sve tri komponente brzine vjetra (u , v , w), perturbacije potencijalne temperature, geopotencijala, prizemnog tlaka suhog zraka i skalara kao što su turbulentna kinetička energija (TKE) te omjer miješanja (q) za različite faze vodene pare. Prilikom proračuna koristi se razmaknuta Arakawa C mreža. Vertikalna mreža koristi η -koordinatu koja prati teren te varira od 1 na površini do 0 na gornjoj granici gdje je tlak konstantan. Broj vertikalnih nivoa je 97, s najnižim na približno 5 m iznad površine te s definiranih 25 nivoa u prvih 1 km. Pri vrhu modela koristi se apsorbi-

rajući sloj radi prigušivanja težinskih valova. Od korištenih parametrizacija u modelu mogu se izdvojiti Dudhia i RRTM (engl. *Rapid Radiative Transfer Model*) shema za dugovalno i kratkovalno zračenje (Dudhia, 1989; Mlawer i sur., 1997); *Morrison 2-Moment* shema za mješovite procese nastanka oblaka i oborine (Morrison i sur., 2009); parametrizacija temperature tla s pet nivoa (Dudhia, 1989); Mellor-Yamada-Janjić (MYJ) shema za atmosferski granični sloj (ABL) te Betts-Miller-Janjić shema za parametrizaciju kumuluse naoblake (Janjić, 1994). Parametrizacija kumulusa se radi samo u najvećoj domeni.

Tablica 5. Postavke domena u WRF modelu za odabrane slučajeve pijavica.

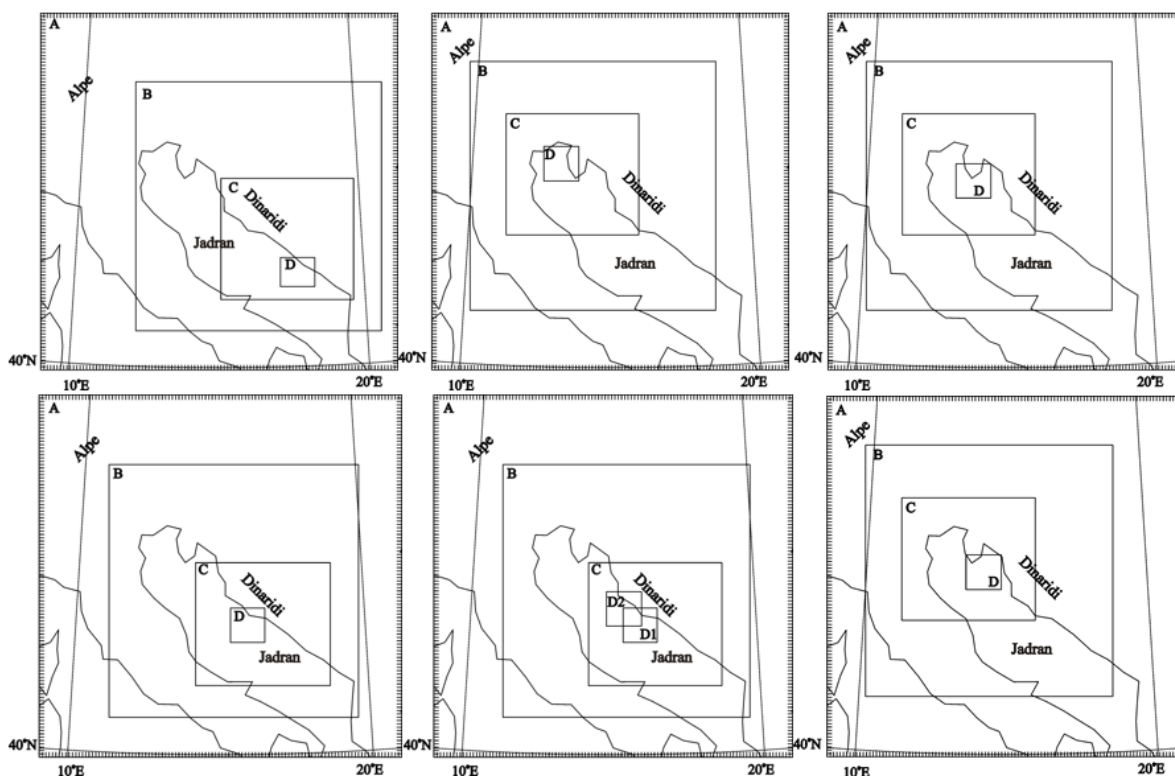
Slučajevi	Dubrovnik 28.08.2013. Dubrovnik 25.09.2015.	Novigrad 30.06.2014.	Pula 28.08.2013. Ližnjan 15.08.2014.	Hvar 24.09.2015. Komiža 14.01.2016.
Mrežni koraci po domenama A, B, C, D	9 km, 4.5 km, 1.5 km, 0.5 km	9 km, 4.5 km, 1.5 km, 0.5 km	9 km, 4.5 km, 1.5 km, 0.5 km	9 km, 4.5 km, 1.5 km, 0.5 km
Broj vertikalnih nivoa	97	97	97	97
Ulaz	ECMWF 0.125°x0.125° Corine land use (100 m) SRTM (90 m)	ECMWF 0.125°x0.125° Corine land use (100 m) SRTM (90 m)	ECMWF 0.125°x0.125° Corine land use (100 m) SRTM (90 m)	ECMWF 0.125°x0.125° Corine land use (100 m) SRTM (90 m)
Početak/kraj simulacije	27.08.2013. u 12 UTC	29.06.2014. u 12 UTC	27.08.2013. u 12 UTC	23.09.2015. u 12 UTC
	29.08.2013. u 00 UTC		29.08.2013. u 00 UTC	25.09.2015. u 00 UTC
	24.09.2015. u 12 UTC	01.07.2014. u 00 UTC	14.08.2014. u 12 UTC	13.01.2016. u 12 UTC
	26.09.2015. u 00 UTC		16.08.2014. u 00 UTC	15.01.2016. u 00 UTC

Slučajevi	Split 06.01.2016.	Murter 13.01.2016.	Mali Lošinj 11.02.2016.
Mrežni koraci po domenama A, B, C, D	9 km, 4.5 km, 1.5 km, 0.5 km	9 km, 4.5 km, 1.5 km, 0.5 km	9 km, 4.5 km, 1.5 km, 0.5 km
Broj vertikalnih nivoa	97	97	97
Ulaz	ECMWF 0.125°x0.125° Corine land use (100 m) SRTM (90 m)	ECMWF 0.125°x0.125° Corine land use (100 m) SRTM (90 m)	ECMWF 0.125°x0.125° Corine land use (100 m) SRTM (90 m)
Početak/kraj simulacije	05.01.2016. u 12 UTC	12.01.2016. u 12 UTC	10.02.2016. u 12 UTC
	07.01.2016. u 00 UTC	14.01.2016. u 00 UTC	12.02.2016. u 00 UTC

Podaci o orografiji potječu s rezolucije od 90 m iz SRTM (eng. *Shuttle Radar Topographic Mission*) digitalne baze podataka o topografiji (<http://www.cgiar-csi.org/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1>). Podaci o visini terena su potom usklađeni s podacima zemljišnog pokrova koji su razlučeni svakih 100 m pomoću CORINE (*Coordination of Information on the Environment Land Cover*, CLC) baze pokrova zemljišta. Početni i rubni uvjeti su preuzeti iz analize ECMWF centra (*European Centre for Medium-range Weather Forecasts*) na rezoluciji 0.125° na standardnim izobarnim plohama svakih 6 h. Pri tome treba spomenuti da se preuzima i polje SST. S obzirom da se s profinjenjem mreže bolje razlučuje obalna crta, nužno je što realnije prikazati SST polja. Model ECMWF s horizontalnim mrežnim korakom od 0.125° (~12 km) ne može "vidjeti" sve detalje obale Jadrana i SST prostorne raspodjele. Time se unose pogreške ECMWF modela (vidljive kao umjetno zagrijana područja) u WRF simulacije na finijim rezolucijama (Telišman Prtenjak i sur., 2015). Stoga je ovdje rađena korekcija SST polja dobivenih iz ECMWF, za potrebe WRF numeričkih simulacija koje otklanjaju uočene početne nepravilnosti. Simulacije se izvode u Lam-

bertovoj stožastoj projekciji na četiri ugniježdene domene koje komuniciraju u dva smjera (engl. *two-way nesting*).

Najveća domena obuhvaća Apeninski poluotok, zapadni dio Balkanskog poluotoka te Alpe s mrežnim korakom od 9 km. Ostale ugniježdene domene se mijenjaju ovisno o odabranom slučaju (tablica 5). Fokusirajući se na domenu interesa, svaka najmanja D domena ima razlučivost od 500 m te pokriva područje interesa gdje su uočene pijavice. Rezolucija modela (od 500 m) ne omogućava eksplicitno razlučivanje pijavica u modelu. Međutim, cilj je bio što je moguće bolje obuhvatiti meteorološke uvjete i karakteristike atmosfere na području gdje su se pijavice razvile. S obzirom da se htjelo analizirati i utjecaj SST te utjecaj sezone na uvjete u kojima se pojavljuju pijavice, odabrano je 7 verzija postavki modela, a s tri verzije su obuhvaćena po dva slučaja pojave pijavica (slika 3.2). Simulacije su trajale 36 h, a započinjale su u podne prethodnog dana, zbog uvažavanja tzv. *spin-up* vremena.



Slika 3.2. Na svakoj slici su prikazane četiri ugniježdene domene modela (A-D) s horizontalnom razlučivošću od 9 km (A), 4.5 km (B), 1.5 km (C), 0.5 km (D). Najmanja domena obuhvaća šire područje Dubrovnika (gore lijevo), Novigrada (gore sredina), Ližnjana i Pule (gore desno), Hvara i Komiže (dolje lijevo), Splita (D1) i Murtera (D2) (dolje sredina) i Malog Lošinja (dolje desno).

3.1.4 SHARPPy

SHARPPy je program za obradu i grafički prikaz radiosondažnih podataka, a pogodan je za korištenje u operativne i istraživačke svrhe. Predstavili su ga Marsh i Hart

(2012) na konferenciji Američkog meteorološkog društva (engl. *American Meteorological Society*, AMS). SHARPPy je zapravo SHARP (*Skew-T and Hodograph Analysis Research Program*) program, koji se koristi u Centru za prognozu nevremena (engl. *Storm Prediction Center*, SPC) u Sjevernoj Americi, napisan u programskom jeziku Python, koji je također besplatan. Vertikalni profili tlaka, temperature, temperature rosišta, u i v komponente vjetra (ili iznos brzine vjetra i smjer) te visina na kojoj su ovi meteorološki parametri izmjereni, čine ulazne podatke (engl. *input*). Izlazni podaci programa su termodinamički indeksi nestabilnosti (CAPE, CIN, KI itd.) i kinematički parametri (smicanje vjetra, srednji vjetar itd.), a moguće je odmah dobiti izlazne podatke, bez grafičkog prikaza emagrama, jer se grafičke rutine u SHARPPy-u oslanjaju na numeričke, ne obratno. SHARPPy je besplatan i moguće ga je preuzeti sa stranice <http://www.github.com/metpy/sharppy>, gdje se nalaze i upute za korištenje.

3.2 Metoda računa Szilagyi-evog indeksa za pijavice

Za račun SWI je potrebno prvo provjeriti iznos brzine vjetra na visini 850 hPa plohe (W_{850}), jer pijavica se neće pojaviti kada je $W_{850} > 20 \text{ m/s}$. Zatim se računa ΔT tj. razlika temperature vodene površine (engl. *Sea Surface Temperature*, SST) i temperature na visini 850 hPa plohe (T_{850}). Proračun zahtijeva i određivanje razlike visine nivoa EL i LCL tj. ΔZ . Za parove vrijednosti ΔT i ΔZ se određuje vrijednost SWI iz tablice ili grafički sa slike 1.7.

Izlazni rezultati WRF modela su četiri datoteke za svaku od domena, u ovom radu se koriste datoteke za dvije najmanje domene: C s razlučivanjem od 1.5 km i D s razlučivanjem od 500 m. Cilj je iz ovih datoteka dobiti pseudo-sondaže, odnosno sondaže koje nisu dobivene radiosondažnim mjerenjima već su produkti modela. Pseudo-sondaže sadrže temperaturu zraka i rosišta, tlak, brzinu i smjer horizontalnog vjetra na 97 vertikalnih nivoa. Izdvojene su pseudo-sondaže 1 ili 1/2 h prije pojave pijavice i one čine ulazne podatke za dva programa, jedan od njih je već navedeni SHARPPy, a drugi je izvorni algoritam koji je Szilagyi koristio pri izradi nomograma za pijavice. Izvorni algoritam je radi svoje jednostavnije strukture korišten pri računu SWI indeksa za cijelu C i D domenu. Njime su računate visine kritičnih nivoa česti LCL i EL, te temperatura i vjetar na visini 850 hPa plohe, što je uz SST dovoljno za odrediti SWI vrijednost. Ulazne podatke za SHARPPy program čini samo 20 pseudo-sondaža odabranih iz najmanje domene iznad morske površine u okolini mjesta s kojeg su pijavice uočene. Kao složeniji program, osim navedenih parametara potrebnih za izračun SWI, SHARPPy računa termodinamičke indekse: CAPE, CAPE3 (CAPE 0-3 km), CIN, TT i KI, te kinematički parametar: smicanje u sloju 0-1 km i 0-6 km visine.

U sljedećim poglavljima rezultati izvornog algoritma su za svaki slučaj pojave pijavica prikazani vrijednostima SWI za C i D domenu, a vrijednosti ΔT i ΔZ su prikazane samo za D domenu. Za što pregledniji prikaz 20 vrijednosti SWI indeksa i 20

prethodno navedenih termodinamičkih indeksa te kinematičkih parametara dobivenih SHARPPy programom korišten je dijagram s pravokutnikom (slika 3.3).

Za svaki slučaj pojave pijavica dodatno je napravljena usporedba pseudo-sondaža sa sondažom iz Zadra u terminu prije pojave pijavice. Ujedno je rađena usporedba modeliranih vrijednosti temperature, relativne vlažnosti i brzine horizontalnog vjetra s METAR podacima zračnih luka najbližih mjestu s kojeg su pijavice uočene. Sve dobivene slike i svi podaci su obrađeni korištenjem programskog paketa MATLAB i Python.



Slika 3.3. Gornja i donja baza svakog pravokutnika prikazuje 25-postotni, odnosno 75-postotni percentil. Vodoravna linija unutar pravokutnika je medijan, a znakom 'x' je označen srednjak. Minimum i maksimum predstavljaju najmanji i najveći podatak koji se nalazi unutar 1.5 puta interkvartilnog raspona gledajući od donjeg, odnosno gornjeg kvartila. Plusevi označavaju vrijednosti koje znatno odstupaju od medijana (engl. *outliers*).

4 Rezultati i diskusija

4.1 Analiza pijavica po sinoptičkim tipovima vremena

Dosadašnja istraživanja pokazuju da su pijavce “lijepog vremena” obično povezane s LW i SWT tipom, a pijavice povezane s grmljavinskim nevremnom sa SW i CLOSED tipom vremena (Sioutas i Keul, 2007). Stoga se u ovom poglavlju detaljnije analiziraju pojedini slučajevi koji predstavljaju reprezentativne primjere sinoptičkih situacija u danima s pojavom pijavica, te su posebno razmotrene pijavice istog sinoptičkog tipa vremena u toplom i hladnom dijelu godine. Preostali slučajevi su sažeto analizirani te su istaknute razlike u odnosu na predstavnike grupe.

4.1.1 Sinoptički tip: Jugozapadno strujanje (SW)

U skladu s tablicom 4 iz prethodnog poglavlja četiri slučaja pojave pijavica dogodila su se za vrijeme visinskog jugozapadnog strujanja na prednjoj strani doline koja se pružala nad Jadranom: pijavice pred Dubrovnikom i Pulom 28.08.2013. godine, pijavice kod Ližnjana 15.08.2014. godine, te pijavica koja se pojavila kod Splita 06.01.2016. godine.

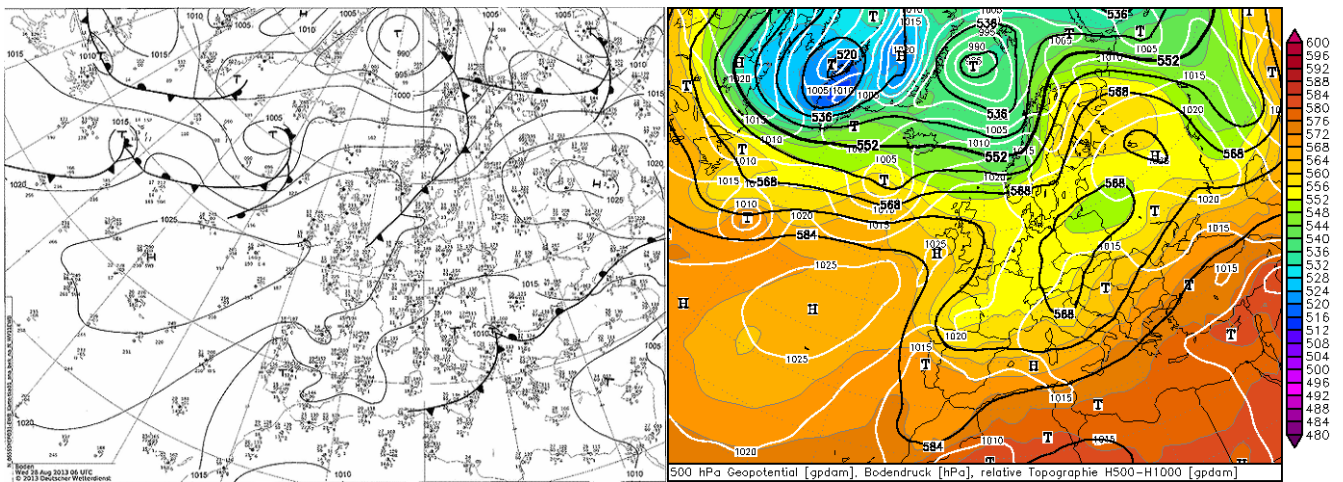
Pijavice kod Dubrovnika

Prema dostupnim podacima 28.08.2013. godine na Jadranu je zabilježen najveći broj pijavica u jednom danu u cijelom Sredozemlju (Sioutas i sur., 2014). Motrena je 41 pijavica na području istočne Jadranske obale, a čak 30 ih je opaženo u neposrednoj blizini grada Dubrovnika zahvaljujući timu *Storm Chasers Dubrovnik* (slika 4.1). Na zapadnoj obali Istre također su se javile pijavice, a sumnja se da je jedna od njih zahvatila brodicu nedaleko od brijunskog otočja te time uzrokovala nesreću u kojoj je poginuo tamošnji ribar.

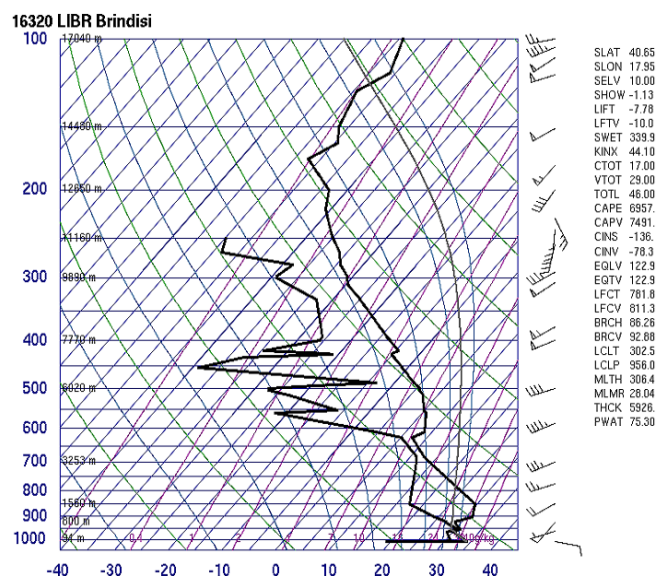


Slika 4.1. Ljevčkasti oblaci (lijevo, snimio: Karlo Repac) i pijavica pred Dubrovnikom (desno, snimio: Nikša Duper) 28.08.2013. godine.

Na vrijeme je tog dana utjecala duboka dolina koja se pružala od Rusije preko srednje Europe sve do zapadnog Sredozemlja, odnosno sjeverne Afrike i Maroka. Na periferiji spomenute doline nalazi se nekoliko dolina u obliku kratkog vala od kojih će se jedna premještati preko Italije (slika 4.2). Ova situacija je svrstana u sinoptički tip SW s prelazom u SWT tijekom dana. Na područje Jadrana u izraženoj jugozapadnoj struji stiže nestabilan i vlažan zrak. Svi uvjeti potrebni za konvekciju su prisutni, vlažan zrak u prizemnim slojevima, potom i advekcija uzdignutog sloja miješanja s područja Sahare. Ovakva kombinacija ima za posljedicu preklapanje visokih vrijednosti CAPE-a (6957 J/kg) i snažnog smicanja u dubljem sloju (od 0 do 6 km) zbog prisutnosti mlazne struje po visini (slika 4.3).



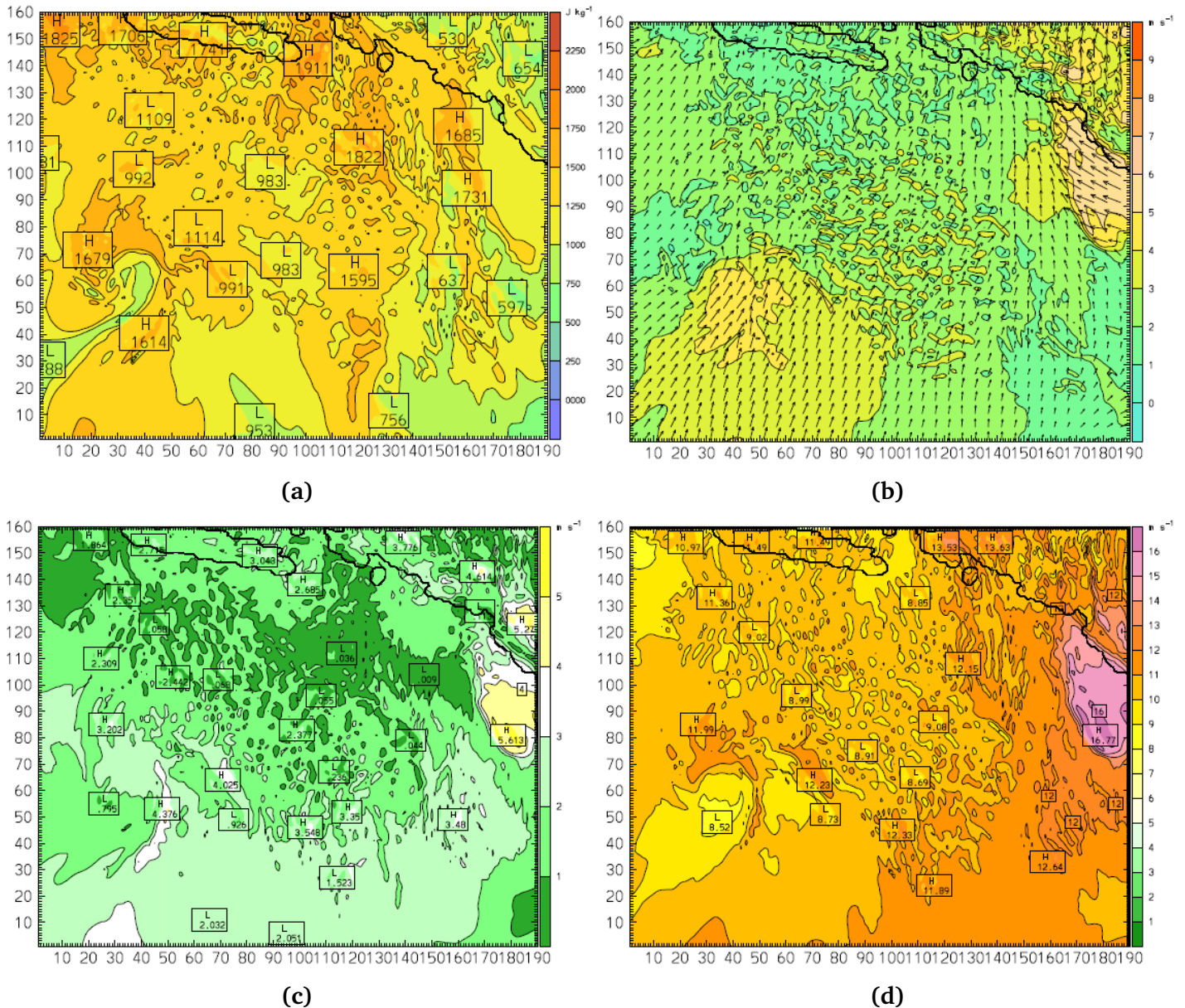
Slika 4.2. Prizemna sinoptička karta (lijevo), karta apsolutne topografije 500 hPa (crne linije) i relativne topografije 500/1000 hPa (osjenčano u boji) (desno) u 06 UTC 28.08.2013. godine (izvor: <http://www.wetter3.de>).



Slika 4.3. Termodinamički dijagram radiosondaže za Brindisi u 00 UTC 28.08.2013. godine (izvor: <http://weather.uwyo.edu>).

Promatrane su pijavice u 08 UTC, a kako u tom danu nije bilo atmosferskog elek-

tričnog pražnjenja na dubrovačkom području ove pijavice klasificiramo kao one “lijepog vremena”. Pseudo-sondaže za C i D domenu analizirane su 1 h prije pojave pijavica tj. u 07 UTC. Područje unutar kojeg je izdvojeno 20 pseudo-sondaža za proračun SHARPPy programom prikazano je na slici slici 4.5b.

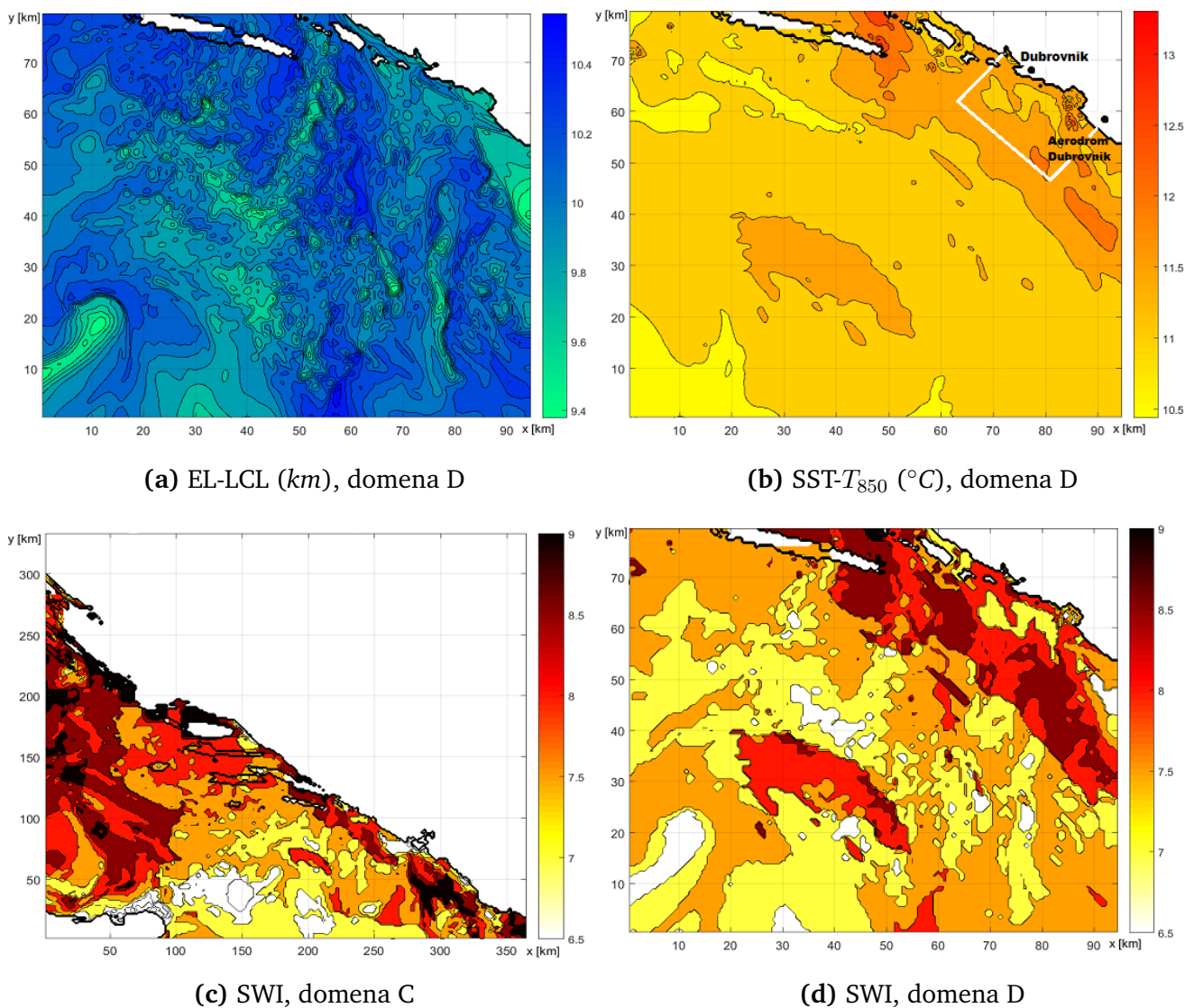


Slika 4.4. Modelirane vrijednosti u 08 UTC 28.08.2013. godine za domenu D (vidi sliku 3.2): (a) CAPE, (b) brzina i smjer vjetra na 10 m, (c) smicanje vjetra u sloju 0-1 km, (d) smicanje vjetra u sloju 0-3 km.

CAPE poprima vrlo visoke vrijednosti u cijelom dubrovačkom akvatoriju i nad otvorenim morem (slika 4.4a), gdje maksimalna vrijednost iznosi $1911\ J/kg$. Modelirane vrijednosti uz samu obalu su neznatno manje u trenutku pojave pijavica (od 1200 do $1600\ J/kg$), a ne razlikuju se od onih dobivenih SHARPPy programom za točke neposredno uz obalu 1 h ranije (slika 4.6). Iako LINET sustav nije detektirao električno pražnjenje, vrijednosti CAPE-a znatno su veće od onih koje su dobili Renko

i sur. (2016) za pijavice “lijepog vremena”. Modelske CAPE vrijednosti neočekivano su usporedive s maksimalnim vrijednostima dobivenim za pijavice povezane s grmljavinskim nevremenom.

Na slici 4.4b smjer vjetra zakreće s jugoistočnog (jugo) u južni i jugozapadni smjer što na užem području oko grada Dubrovnika stvara izraženo smicanje od 1 do 6 m/s u sloju od 0 do 1 km visine (slika 4.4c), te 7 do 12 m/s u sloju od 0 do 3 km visine (slika 4.4d). SHARPy uz samu obalu u 07 UTC daje srednju vrijednost smicanja od 19.4 m/s u sloju od 0 do 6 km visine (slika B.11 u Dodatku B) što je nešto veće od prosjeka kojeg su Renko i sur. (2016) dobili za pijavice “lijepog vremena”.

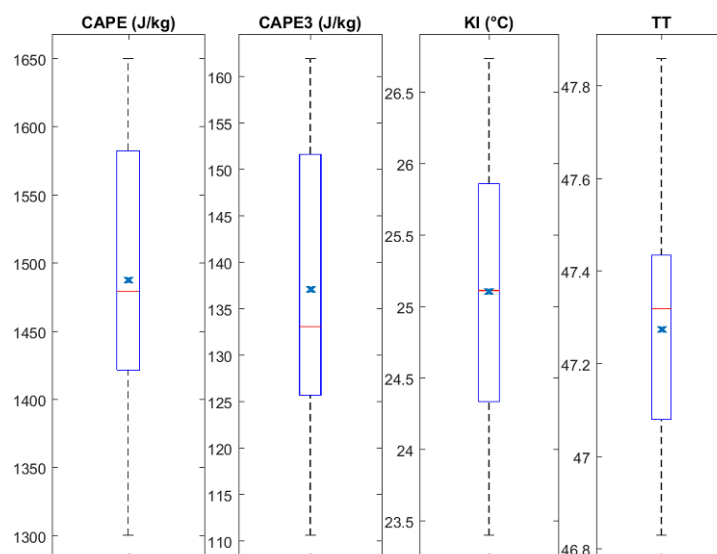


Slika 4.5. Razlike visina EL i LCL, razlike SST i temperature na 850 hPa plohi za domenu D, te vrijednosti SWI za domenu C i D u 07 UTC 28.08.2013. godine.

Razlika visina kritičnih nivoa česti EL i LCL je u cijeloj D domeni bila oko 10 km (slika 4.5a). Razlika SST i temperature na 850 hPa je između 10.5 i 13.5 $^{\circ}C$ pri čemu su veće vrijednosti uglavnom koncentrirane uz obalu (slika 4.5b). Ovakvi parovi vrijednosti $EL - LCL$ i $SST - T_{850}$ daju visoke vrijednosti SWI (slika 4.5c i

4.5d) što nam govori da su uvjeti vrlo povoljni za nastanak pijavice i na C i na D domeni.

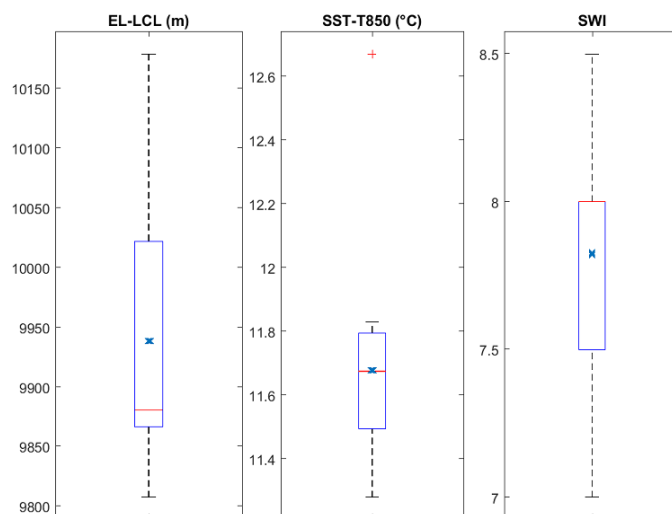
Rezultati SHARPPy programa za pseudo-sondaže uz obalu daju sljedeće srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti atmosfere: $CAPE = 1487.7 \text{ J/kg}$, $KI = 25$, $TT = 47$ i $CIN = -0.34 \text{ J/kg}$. Usporedbom s teorijskim vrijednostima danima u tablicama 1-3, vidi se da su srednje vrijednosti KI i TT indeksa dovoljne za razvoj grmljavinskih oluja. Vrijednosti CAPE-a sugeriraju umjereno nestabilnu atmosferu, a ovako male vrijednosti CIN-a bi značile da je potrebno neznatno podizanje česti s kojim se ona dovodi do nivoa slobodne konvekcije, nakon čega može iskoristiti cijelu konvektivnu raspoloživu energiju za vertikalno dizanje. Slične rezultate, KI oko 30, TT oko 48 i CIN oko -6 J/kg , dobili su za područje Jadrana u svom radu Sioutas i Keul (2007) za 11 slučajeva pijavica (4 povezana sa grmljavinskim olujama, 7 pijavica “lijepog vremena”). Za srednju vrijednost CAPE-a dobili su približno trećinu gore navedenog (575 J/kg). Na slici 4.6 vidi se da svi prikazani parametri nestabilnosti imaju malu disperziju vrijednosti, a TT indeks ima najmanju disperziju vrijednosti u usporedbi s ostalim slučajevima (slika B.5 u Dodatku B).



Slika 4.6. Indeksi nestabilnosti atmosfere: CAPE, CAPE3, KI i TT za sve pseudo-sondaže iz označenog dijela domene D (vidi sliku 4.5b) u 07 UTC 28.08.2013. godine u dubrovačkom akvatoriju. Opis prikaza isti je kao na slici 3.3.

Na slici 4.7 uočava se da razlika visina ravnotežnog nivoa i nivoa kondenzacije česti također ima mali raspon vrijednosti te veliku srednju vrijednost koja iznosi gotovo 10 km što je u skladu s rezultatima na slici 4.5a. Visina do kuda se oblaci mogu razviti je na približno 10.5 km visine. Ovo bi značilo da je podnica konvektivnog oblaka na maksimalno 500 m visine. Ova vrijednost odgovara minimalnoj vrijednosti visine podnice oblaka (LCL) koju su Renko i sur. (2016) dobili za pijavice “lijepog vremena” koje čine 50 % promatranog uzorka u dvanaestogodišnjem razdoblju. Interkvartilni raspon parametra ΔT je manji od 0.5 °C , a jedna od vrijednosti ($\Delta T = 12.7 \text{ °C}$) odstupa za 1 °C od medijana. Vrijednosti SWI su povoljne (>0), a u

čak 12 točaka domene vrijednost SWI je 8, što je u skladu s vrijednostima SWI na slici 4.5d.



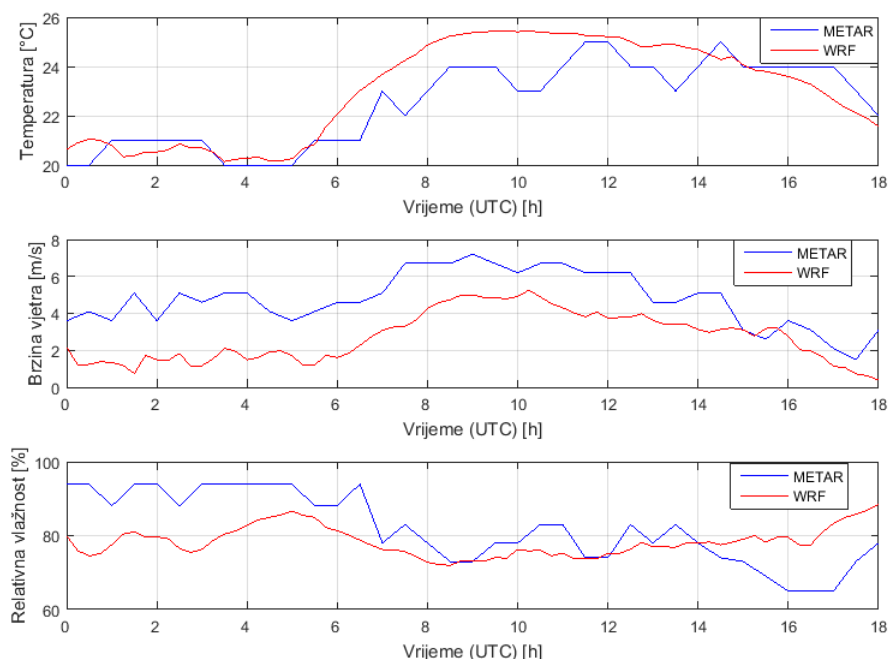
Slika 4.7. Veličine: $EL - LCL$, $SST - T_{850}$ i SWI za sve radiosondaže iz označenog dijela domene D (vidi sliku 4.5b) u 07 UTC 28.08.2013. godine u dubrovačkom akvatoriju. Opis prikaza isti je kao na slici 3.3.

Dodatna provjera uspješnosti simulacije vremenskih uvjeta 28.08.2013. godine napravljena je usporedbom vremenskih nizova METAR mjerenja temperature, brzine vjetra i relativne vlažnosti sa zračne luke Dubrovnik s modelski najbližom točkom. Modelirana temperatura što se tiče trenda prati niz mjerenja, no nakon 5:30 UTC počinje precjenjivati vrijednosti, pa tako u terminu pojave pijavica (08 UTC) predviđa $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ veću temperaturu. Vjetar je pak podcijenjen gotovo cijelo vrijeme za otprilike 2 m/s , a mjerena i modelirana relativna vlažnost u terminu pojave pijavica je gotovo jednaka, oko 75 % (slika 4.8).

Usporedba radiosondažnih mjerenja i pseudo-sondaža (slika 4.9) ovdje je prikazana za Zadar u terminu 00 UTC na dan pojave pijavice. Mjerena i modelska temperatura zraka se jako dobro podudaraju na svim visinama. Temperatura rosišta je nešto lošije reproducirana modelom koji daje vlažniju atmosferu od opažene na visinama od 7 - 9 km, ipak u prvih 6 km postoji dobro podudaranje modela i mjerenja.

Pijavice između Pule i Brijuna

Tijekom ljetnog slučaja 28.08.2013. godine, osim kod Dubrovnika, pijavice su opažene i između Pule i Brijuna u 08 UTC. Nad dubrovačkim akvatorijem nije bilo atmosferskog električnog pražnjenja taj dan, ali na području Istre je ono zabilježeno. Pseudo-sondaže za C i D domenu analizirane su 1 h prije pojave pijavica tj. u 07 UTC. Područje unutar kojeg je izdvojeno 20 pseudo-sondaža za proračun SHARPPy programom prikazano je na slici A.1b u Dodatku A.



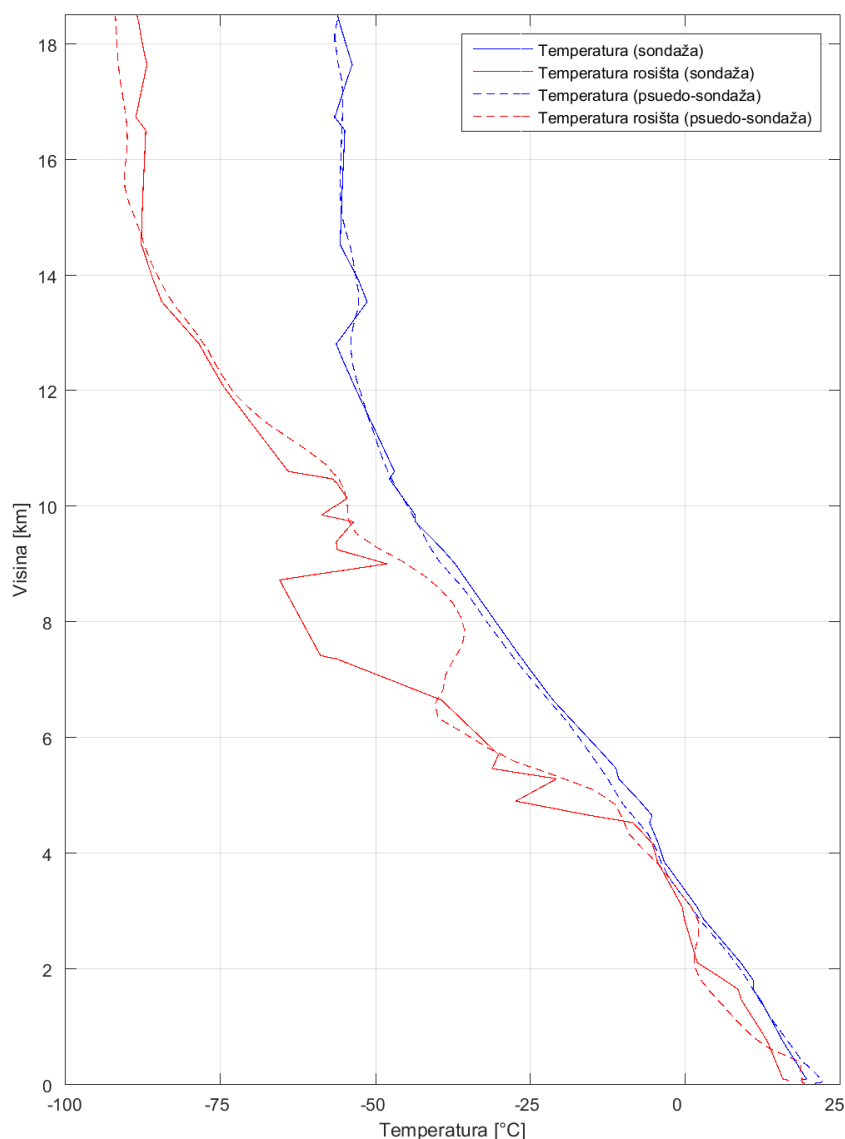
Slika 4.8. Usporedba METAR podataka sa zračne luke Dubrovnik s podacima modela WRF od 00 UTC do 18 UTC 28.08.2013. godine.

Rezultati SHARPPy programa za pseudo-sondaže uz obalu daju sljedeće srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti atmosfere: $CAPE = 1984.1 \text{ J/kg}$, $KI = 32$, $TT = 53$ i $CIN = -7.6 \text{ J/kg}$. Dosta visoke vrijednosti CAPE-a (maksimum: 2223 J/kg) sugeriraju prema tablici 3 umjereno nestabilnu atmosferu (slika B.1 u Dodatku B). KI uz veliki rasap vrijednosti je drugi po iznosu srednje vrijednosti u odnosu na ostale (slika B.4 u Dodatku B), dok TT indeks uz maksimalnu vrijednost od 54.4 sugerira uvjete za izrazito jake oluje (slika B.5 u Dodatku B).

Razlika EL i LCL uz zapadnu obalu Istre bliska je onoj u dubrovačkom akvatoriju (slika A.1a u Dodatku A i B.6 u Dodatku B), a vrijednosti razlike SST i temperature na 850 hPa plohi dobivene izvornim algoritmom i SHARPPy programom dosta variraju (A.1b u Dodatku A i B.7 u Dodatku B). SHARPPy program i izvorni algoritam u svim točkama prognoziraju pojavu pijavica s dosta visokim vrijednostima SWI, a na slici A.1d u Dodatku A sa zapadne obale Istre SWI poprima maksimalne vrijednosti. U odnosu na druge slučajeve u ovom se pojavljuje značajno horizontalno smicanje vjetra na 850 hPa nivou, gdje vrijednosti brzine direktno uz pulsku obalu variraju od 2.6 do 10.3 m/s (slika B.9 u Dodatku B).

Pijavice kod Ližnjana

Zadnji odabrani ljetni slučaj sinoptičkog tipa SW zbio se 15.08.2014. godine kada su uslijed zahladnjenja nad područjem sjevernog Jadrana nastale dvije pijavice u jutarnjim satima (10:15 UTC) u blizini Ližnjana na jugu istarskog poluotoka. Ove pijavice klasificirane su kao one vezane uz grmljavinsko nevrijeme. Pseudo-sondaže za C i D domenu analizirane su 1 h prije pojave pijavica tj. u 09:15 UTC. Područje unutar



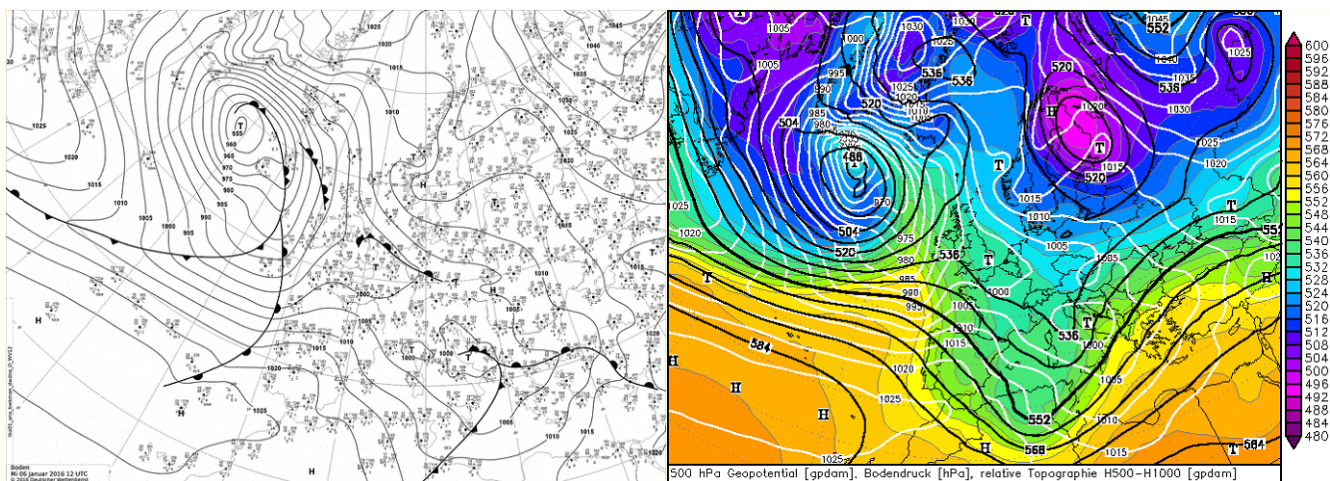
Slika 4.9. Usporedba sondaže i pseudo-sondaže za Zadar u 00 UTC 28.08.2013. godine.

kojeg je izdvojeno 20 pseudo-sondaža za proračun SHARPPy programom prikazano je na slici A.2a u Dodatku A.

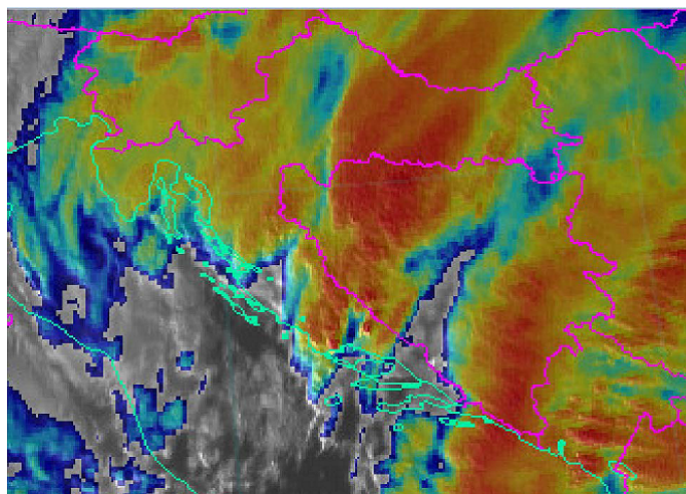
Rezultati SHARPPy programa za pseudo-sondaže uz obalu daju sljedeće srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti atmosfere: $CAPE = 1341.0 \text{ J/kg}$, $KI = 19$, $TT = 43$ i $CIN = -3.7 \text{ J/kg}$. Ova situacija je slična onoj pred Dubrovnikom 28.08.2013. godine, tj. visoke vrijednosti CAPE-a, zanemarivo male vrijednosti CIN-a, a TT indeksi gotovo jednaki dok je KI nešto manji u ovom slučaju (slike B.1, B.3, B.4 i B.5 u Dodatku B). Srednja vrijednost razlike EL i LCL dobivena SHARPPy programom je gotovo 10 km (slika B.6 u Dodatku B), što se slaže s rezultatima izvornog algoritma za označeni dio domene uz obalu (slika A.2a u Dodatku A). SHARPPy daje nešto veće vrijednosti razlike $SST - T_{850}$ nego izvorni algoritam (slika A.2b u Dodatku A i B.7 u Dodatku B), pa time i nešto veće vrijednosti SWI direktno uz obalu (slika A.2d u Dodatku A i B.8 u Dodatku B).

Pijavica kod Splita

Pijavica kod Splita razvila se također za vrijeme SW sinoptičkog tipa, no ono što ju razlikuje od prethodnog slučaja je to da se dogodila zimi. Pojavila se u 15:50 h po lokalnom vremenu 6. siječnja 2016. godine kada ju je zabilježio u dnevnik motrenja i fotografirao Mate Pavić, motritelj glavne meteorološke postaje (GMP) Split - Marjan (slika 1.1). Pijavica se razvila u sklopu nevremena i bila je praćena grmljavinom, tučom i pljuskom kiše.



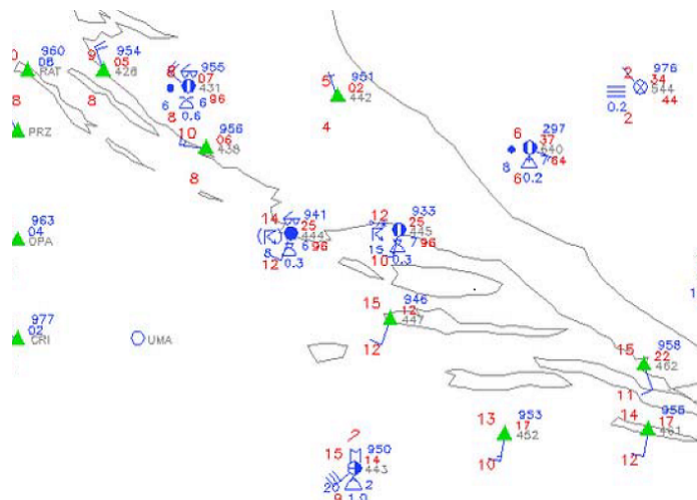
Slika 4.10. Prizemna sinoptička karta (lijevo), karta apsolutne topografije 500 hPa (crne linije) i relativne topografije 500/1000 hPa (osjenčano u boji) u 12 UTC, 06.01.2016. godine (izvor: <http://www.wetter3.de>).



Slika 4.11. Kombinirani produkt koji se sastoji od satelitske snimke visoke prostorne rezolucije (1 km) u vidljivom dijelu spektra (HRV) i infracrvene snimke u kanalu 10.8 μm prostorne rezolucije 3 km pri čemu su vrijednosti temperature prikazane u skali boja (plavo-toplo, crveno-hladno) u 14:50 UTC 06.01.2016. godine (izvor: EUMETSAT, <http://eumetview.eumetsat.int/mapviewer/>).

Tijekom dana preko Hrvatske se premještala visinska dolina i u sklopu nje u poslijepodnevnim satima prizemno se nad srednjim Jadranom nalazila ciklona i pripadni

frontalni poremećaji (slika 4.10). Po visini je u naše predjele stizao hladan zrak i srednji dio Jadrana nalazio se na granici toplije zračne mase koju je potiskivala hladna zračna masa sa sjevera. U takvim okolnostima nastala je linija konvergencije duž koje je bilo izraženo uzlazno gibanje koje je pogodovalo razvoju konvektivnih oblaka lijepo vidljivih na satelitskoj snimci (slika 4.11). Linija konvergencije vidljiva je i na prizemnim mjerenjima vjetra (slika 4.12), naime vjetar sjevernije od Splita već je okrenuo na sjeverozapadni, dok je u vrijeme pojave pijavice na GMP Split - Marjan još puhao jugozapadnjak.



Slika 4.12. Uvećani prikaz SYNOP karte u 15:00 UTC 06.01.2016. godine.

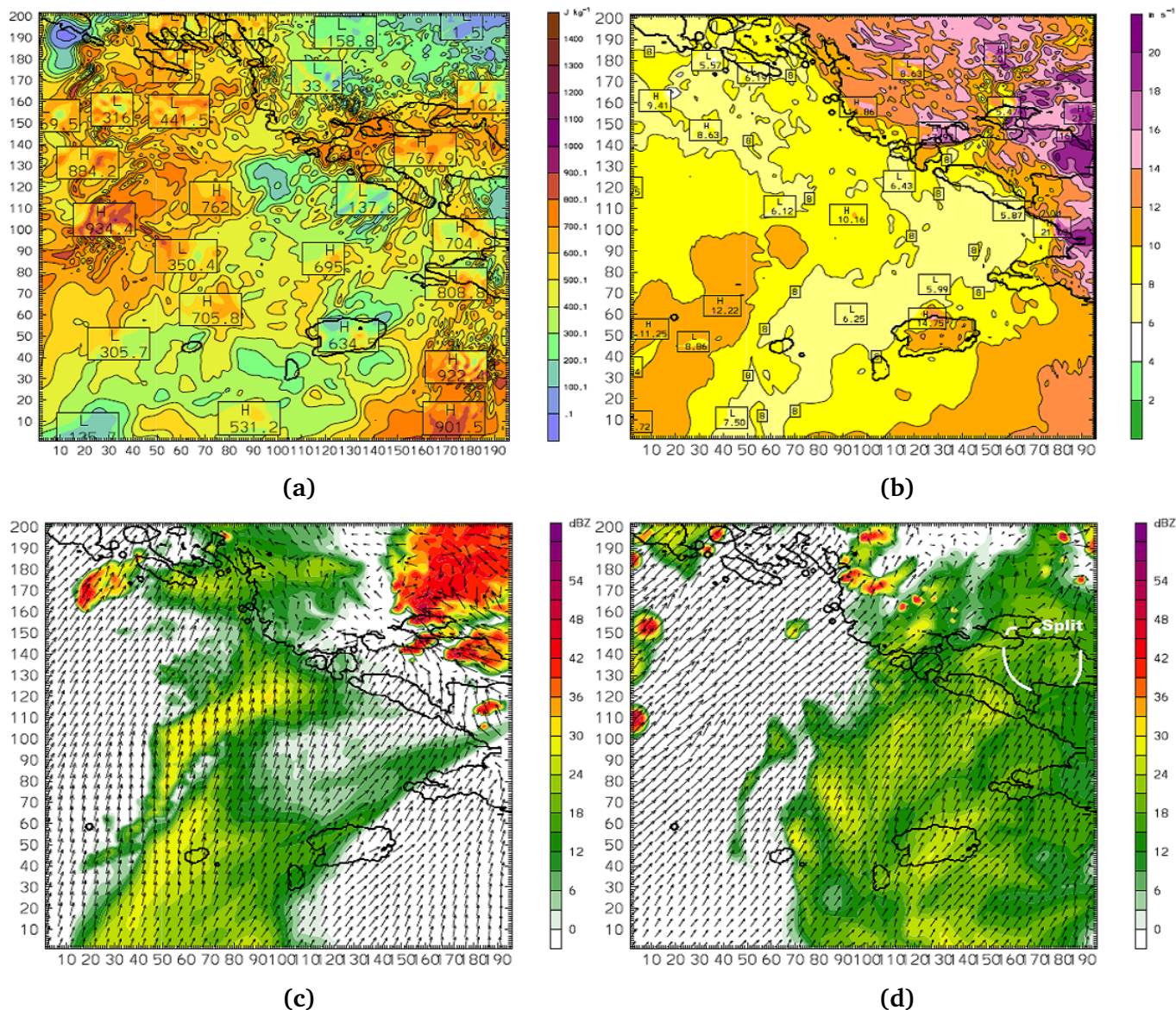
Kako je već navedeno, za vrijeme pojave pijavice u 14:50 UTC zabilježeno je i atmosfersko električno pražnjenje, pa ovu pijavicu klasificiramo kao onu povezanu s grmljavinskim nevremenom. Pseudo-sondaže za C i D domenu analizirane su 1 h prije pojave pijavica tj. u 13:45 UTC. Područje unutar kojeg je izdvojeno 20 pseudo-sondaža za proračun SHARPPy programom prikazano je na slici 4.13d.

Vrijednosti CAPE-a očekivano su manje za ovaj zimski slučaj, no i dalje su dovoljno velike za razvoj konvekcije (slika 4.13a). Maksimalni CAPE od 934.4 J/kg se bilježi na otvorenom moru, dok u splitskom zaleđu maksimalna vrijednost prema rezultatu SHARPPy programa iznosi 770.3 J/kg u 13:45 UTC, a prije same pojave pijavice u 14:45 UTC prema modelu vremenska situacija se nije mnogo promijenila i maksimalni CAPE iznosi 767.9 J/kg.

Maksimalna vrijednost smicanja vjetra neposredno uz splitsku obalu dobivena SHARPPy programom u sloju od 0 do 1 km iznosi 19.7 m/s (slika B.10 u Dodatku B). U debljem sloju od 0 do 6 km model predviđa smicanje od 12 - 22 m/s (slika 4.13b), a SHARPPy daje nešto veće vrijednosti od 15 - 28 m/s (slika B.11 u Dodatku B).

Modelirana refleksivnost oblaka u 13:45 UTC prikazuje prisutnost izražene konvekcije (slika 4.13c), a usporedimo li ju sa satelitskom slikom 4.11 (taj dio obale nije pokriven radarom) možemo vidjeti da je model dao naslutiti da će nad područjem oko Splita biti izraženije konvekcije (oko 40 dBZ).

Na modeliranom vjetru u 14:45 UTC (slika 4.13d) naslućuje se postojanje linije konvergencije na ovorenom moru pri čemu je smicanje izraženije uz samu splitsku obalu, no model nije uhvatio skretanje smjera vjetra s južnog i jugozapadnog na sjeverozapadni koje se vidi na SYNOP-u (slika 4.12) i koje je odigralo značajnu ulogu u nastajanju pijavice.

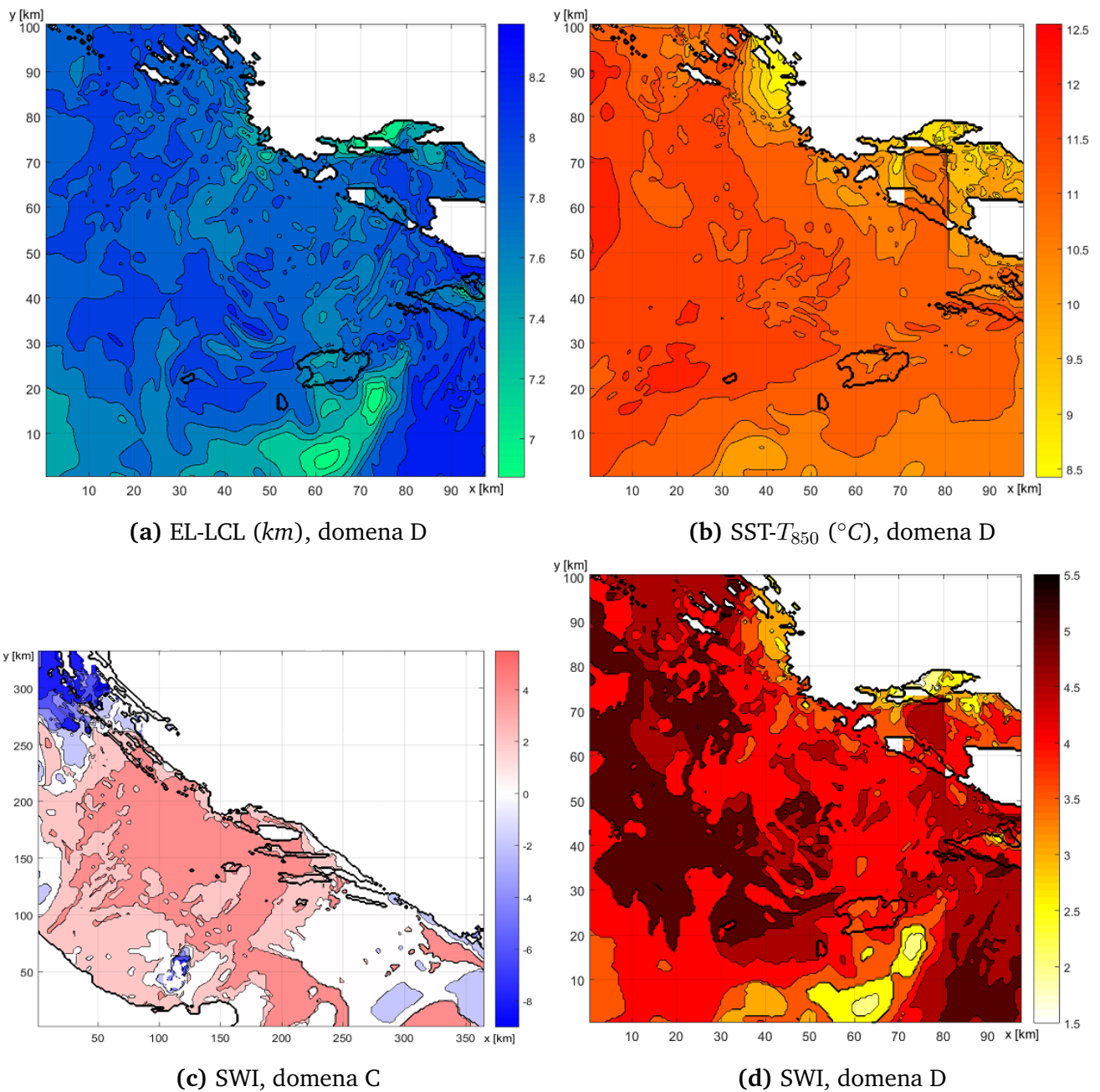


Slika 4.13. Modelirane vrijednosti 06.01.2016. godine za domenu D (vidi sliku 3.2): (a) CAPE u 14:45 UTC, (b) smicanje vjetra u sloju 0-6 km u 13:45 UTC, (c) radarski odraz i polje vjetra na 10 m u 13:45 UTC, (d) radarski odraz i polje vjetra na 10 m u 14:45 UTC.

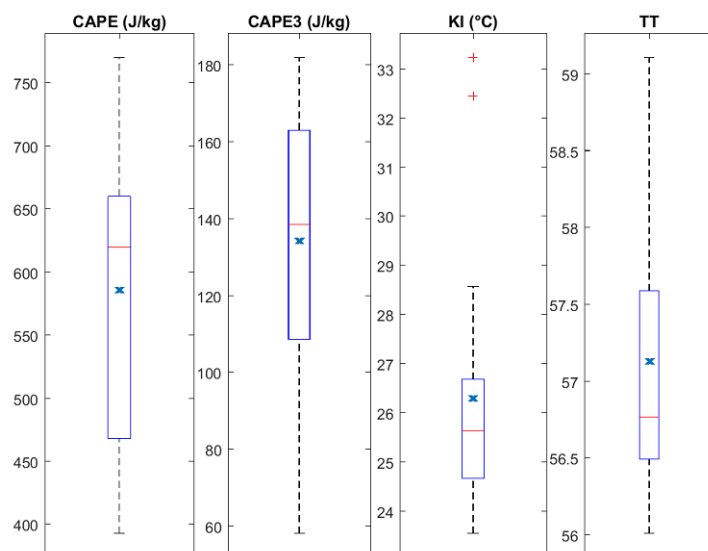
Razlika EL i LCL u D domeni je 7 - 8.2 km (slika 4.14a). Razlika SST i temperature na 850 hPa je između 8.5 i 12.5 °C pri čemu su manje vrijednosti, za razliku od prethodnog ljetnog slučaja pojave pijavice, uglavnom koncentrirane uz obalu (slika 4.14b). Na domeni C vidi se smanjenje vrijednosti SWI na sjevernom dijelu Jadrana nakon prolaska hladne fronte, dok su na srednjem dijelu Jadrana SWI vrijednosti pozitivne tj. uvjeti su pogodni za razvoj pijavice (slika 4.14c). U odnosu na ljetni slučaj ovdje je razlika $EL - LCL$ manja za 2 km, a razlike $SST - T_{850}$ su za 1 - 2 °C

manje, pa su stoga vrijednosti SWI dosta manje, točnije u rasponu od 2.5 do 5.5.

Rezultati SHARPPy programa za pseudo-sondaže uz obalu daju sljedeće srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti atmosfere: $CAPE = 586.2 \text{ J/kg}$, $KI = 26$, $TT = 57$ i $CIN = -2.3 \text{ J/kg}$. Maksimalne vrijednosti TT indeksa idu do gotovo 60, a KI do 33 (slika 4.15). Vrijednosti KI za ovaj slučaj je najviša ukoliko ju usporedimo s ostalim za zimske slučajeve pojave pijavica (slika B.4 u Dodatku B), a vrijednost TT indeksa predviđa veliki potencijal za razvoj jake oluje u skladu s tablicom 2, te je to druga najveća vrijednost ovog parametra u odnosu na svih 10 promatranih slučajeva, na prvom mjestu je drugi zimski slučaj (slika B.5 u Dodatku B).

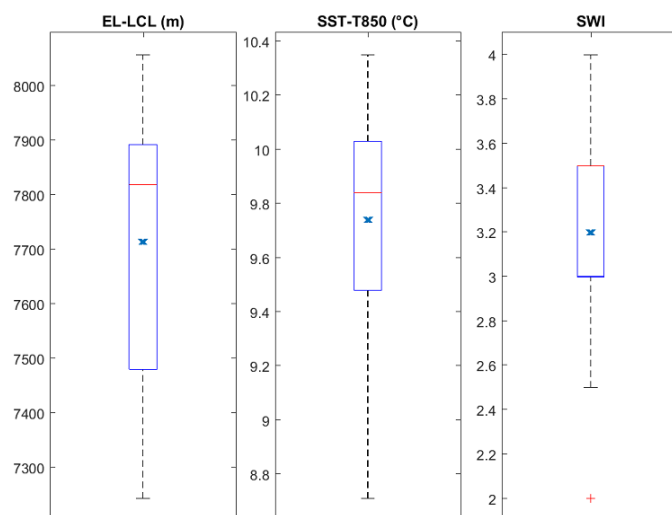


Slika 4.14. Razlike visina EL i LCL, razlike SST i temperature na 850 hPa plohi za domenu D, te vrijednosti SWI za domenu C i D u 13:45 UTC 06.01.2016. godine.



Slika 4.15. Indeksi nestabilnosti atmosfere: CAPE, CAPE3, KI i TT za sve pseudo-sondaže iz označenog dijela domene D (vidi sliku 4.13d) u 13:45 UTC 06.01.2016. godine. Opis prikaza isti je kao na slici 3.3.

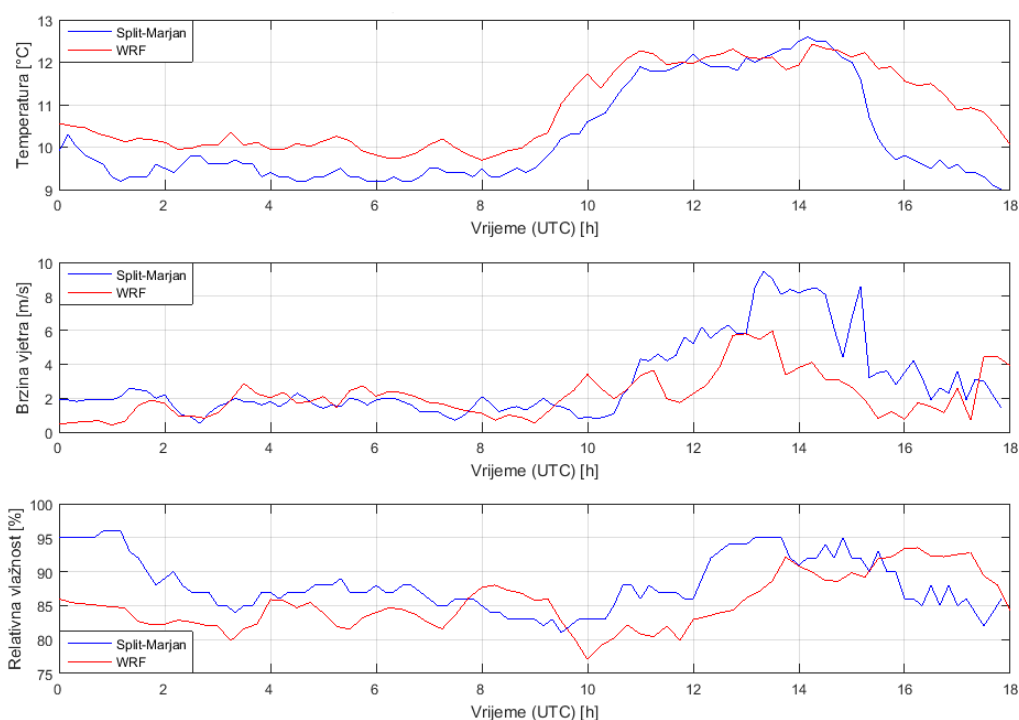
Vrijednosti razlike EL i LCL (od 7.2 do 8.1 km), razlike $SST - T_{850}$ (od 8.7 do 10.4 °) i vrijednosti SWI (od 2 do 4) u splitskom zaleđu dobivene SHARPPy programom (slika 4.16) se odlično poklapaju s onima dobivenim izvornim algoritmom (slika 4.14). Ovaj slučaj u odnosu na ostale zimske slučajeve ima najviše vrijednosti razlike $EL - LCL$, no najmanje vrijednosti razlika $SST - T_{850}$ ne samo u odnosu na zimske, nego u odnosu na sve slučajeve (slika B.6 i B.7 u Dodatku B).



Slika 4.16. Veličine: $EL - LCL$, $SST - T_{850}$ i SWI za sve pseudo-sondaže iz označenog dijela domene D (vidi sliku 4.13d) u 13:45 UTC 06.01.2016. godine. Opis prikaza isti je kao na slici 3.3.

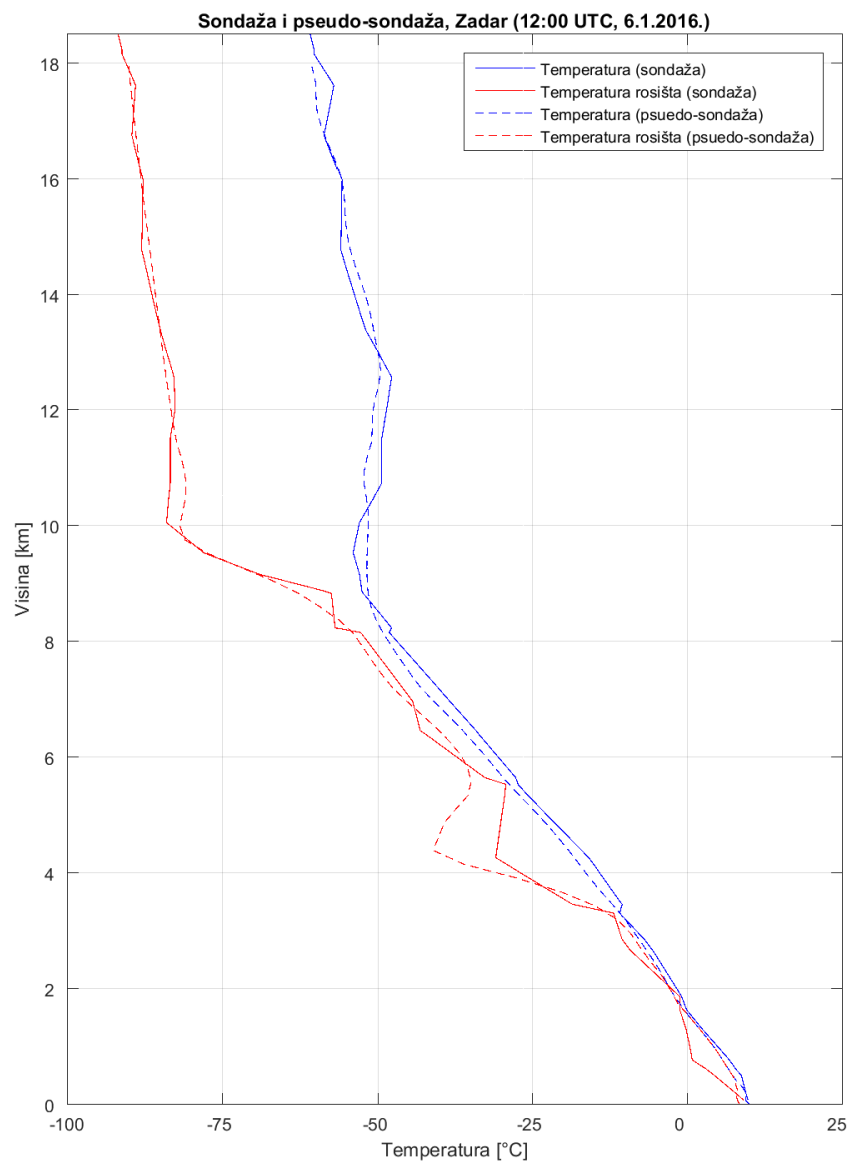
Provjera uspješnosti simulacije vremenskih uvjeta 06.01.2016. godine napravljena je usporedbom vremenskih nizova izmjerene temperature, brzine vjetra i relativne vlažnosti s GMP Split - Marjan s modelski najbližom točkom (slika 4.17).

Modelirani i opaženi niz temperature, što se tiče, trenda gotovo se ne razlikuju do 14:30 UTC. Nakon prolaska pijavice u neposrednoj blizini postaje opažena temperatura naglo pada za 3 - 4 °C u roku od 1 h, a modelska temperatura također bilježi pad, no ne toliko izražen (2 °C u periodu od 3 h). Mjereni i modelirani vjetar se ne razlikuju značajno sve do poslije 10 UTC kada mjereni bilježi nagli porast sa značajnim "vrhom" u terminu pojave pijavice oko 15 UTC. Modelirani vjetar nije "uhvatio" prolazak pijavice, ali daje naznaku prolaska nestabilnosti. Kod relativne vlažnosti može se reći da model relativno dobro prati mjerenja s prosječnim odstupanjem do 10 %, a u trenutku pojave pijavice na postaji razlika opažene i modelske relativne vlažnosti je jako mala.



Slika 4.17. Usporedba METAR podataka sa zračne luke Split s podacima modela WRF od 00 UTC do 18 UTC 06.01.2016. godine.

Usporedba radiosondažnih mjerenja i pseudo-sondaža (slika 4.18) za ovaj slučaj je prikazana za Zadar u terminu 12 UTC na dan pojave pijavice. Mjerena i modelska temperatura zraka i temperatura rosišta se jako dobro podudaraju na gotovo svim visinama. U sloju od 4 do 6 km model daje nešto suši zrak, no na istim visinama u tom sloju modelska i izmjerena temperatura rosišta imaju maksimum i minimum vrijednosti.



Slika 4.18. Usporedba sondaže i pseudo-sondaže za Zadar u 12 UTC 06.01.2016. godine.

4.1.2 Sinoptički tip: Dolina u obliku dugog vala (LW)

Dva slučaja pojave pijavica dogodila su se za vrijeme sporog premještanja doline u obliku dugog vala nad Jadranom: pijavice kod Novigrada 30.06.2014. godine i pijavice kod Komiže 14.01.2016. godine.

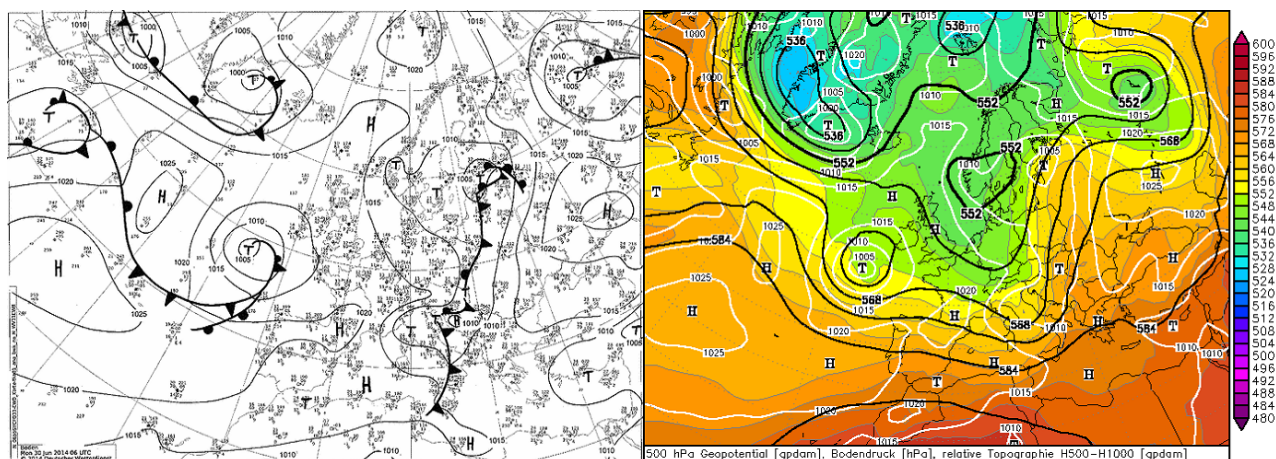
Pijavice kod Novigrada

U jutarnjim satima 30.06.2014. godine na moru kod Novigrada, na zapadnoj obali Istre, uočeno je nekoliko većih pijavica. Prema svjedočenju autorice fotografija, Samantha Smilović, jedna od njih trajala je i više od 15 min, ali nije prešla s mora na kopno (slika 4.19).

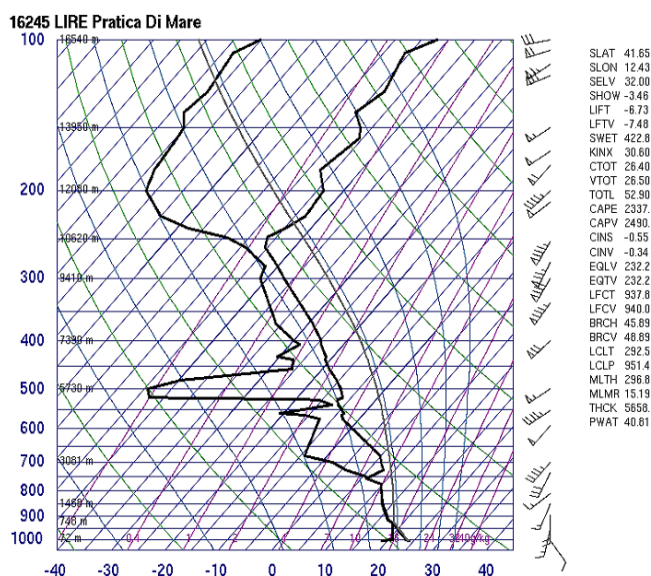


Slika 4.19. Pijavica kraj Novigrada (snimila: Samantha S. Smilović).

Ovu promjenu vremena obilježio je izražen pad temperature zraka. Naime, preko sjevernog Jadrana premještala se hladna fronta povezana s ciklonom nad sjevernom Italijom, a zatim se i samo središte ciklone tijekom jutarnjih sati premjestilo iz Genovskog zaljeva u sjeverni Jadran. Spomenuti poremećaj bio je povezan s dubokom dolinom koja se pružala od Skandinavije prema Sredozemlju (slika 4.20) i u južnoj struji je na područje od interesa stizao nestabilan i vlažan zrak, što je vidljivo iz radiosondaže za Rim u 00 UTC (slika 4.21). Izraženo smicanje vjetra po visini, ali i u sloju 0 - 1 km koje se preklapalo s velikim vrijednostima CAPE-a (2337 J/kg) ukazivali su na mogućnost jake i organizirane konvekcije kao i nastanak pijavica. To jutro je na području Istre bilo jakih pljuskova i grmljavine, a ponegdje je pala i obilnija kiša. Nakon relativno tople noći s jugom, tijekom prijepodneva uslijedio je pad temperature zraka nakon prolaska hladne fronte te okretanja vjetra na sjeverne smjerove (buru).



Slika 4.20. Prizemna sinoptička karta (lijevo), karta apsolutne topografije 500 hPa (crne linije) i relativne topografije 500/1000 hPa (osjenčano u boji) (desno) u 06 UTC, 30.06.2014. godine (izvor: <http://www.wetter3.de>).

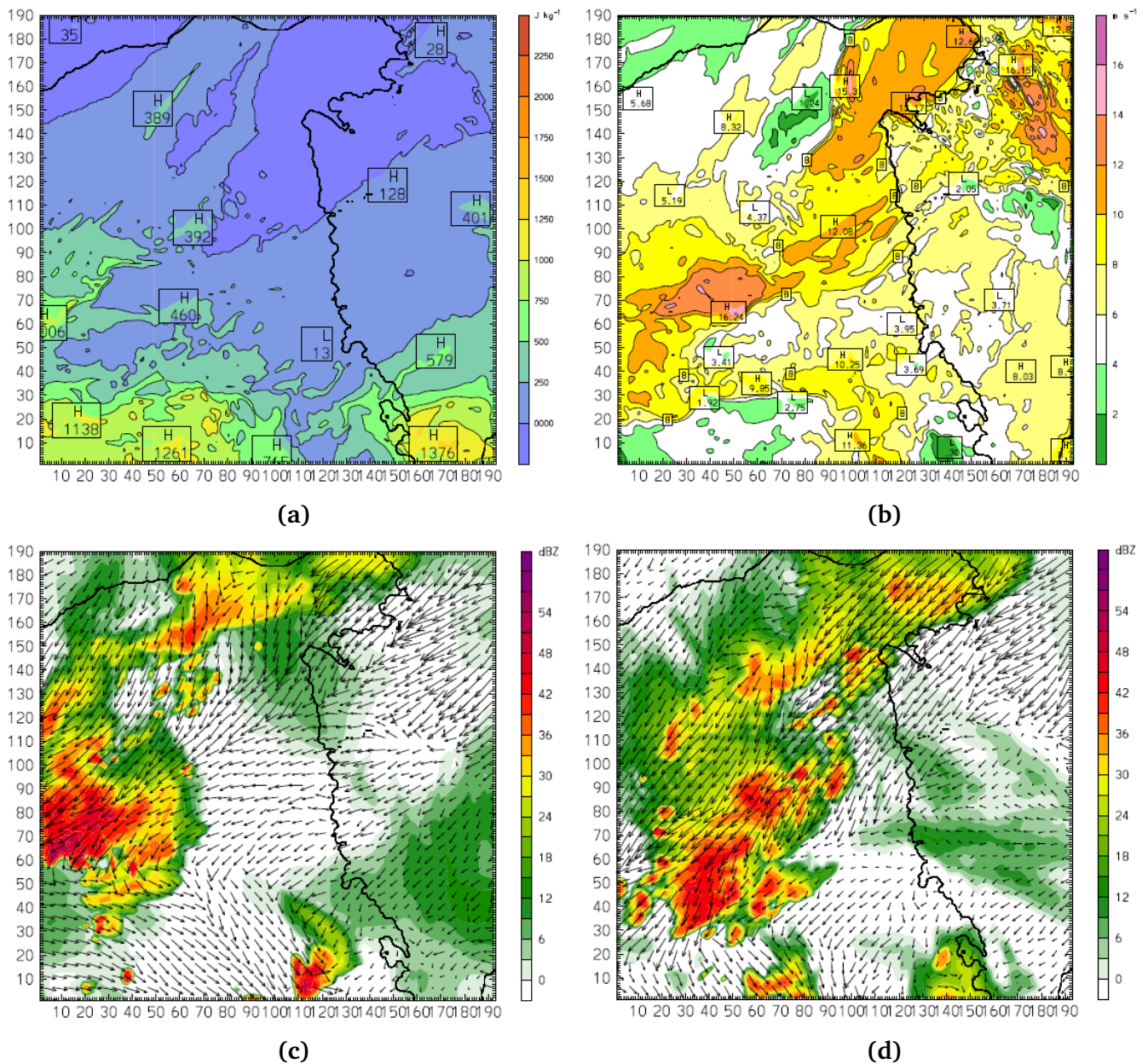


Slika 4.21. Termodinamički dijagram radiosondaže u Rimu u 00 UTC, 30.06.2014. godine (izvor: <http://weather.uwyo.edu>).

Promatrane su pijavice u 08 UTC, a kako je u tom danu bilo atmosferskog električnog pražnjenja ove pijavice klasificiramo kao one povezane s grmljavinskim olujama. Pseudo-sondaže za C i D domenu analizirane su 1 h prije pojave pijavica tj. u 07 UTC. Područje unutar kojeg je izdvojeno 20 pseudo-sondaža za proračun SHAR-Ppy programom prikazano je na slici 4.23b.

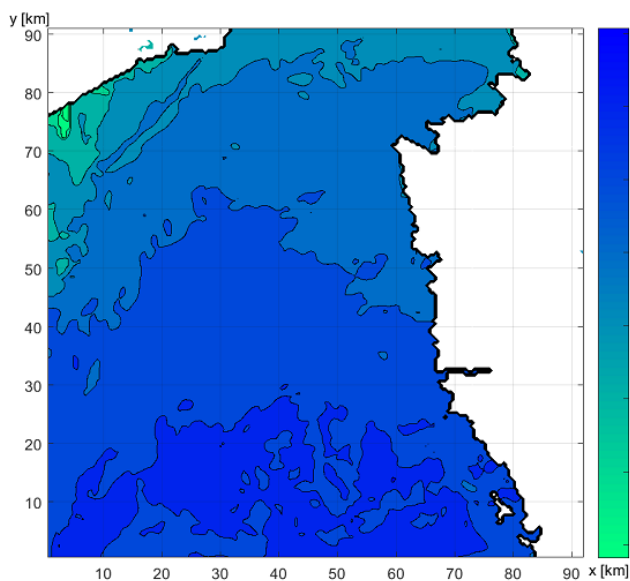
Modelske vrijednosti CAPE-a na obali ispred Novigrada i dijelu otvorenog mora su dosta niske, osim prema jugu istarskog poluotoka (slika 4.22a). Prema SYNOP podacima prije pojave pijavica puhao je jugozapadni vjetar, a u terminu 09 UTC zabilježena je bura. Modelirani vjetar ima istočni i sjeveroistočni smjer već u 06 UTC (slika 4.22c), a na visini 850 hPa plohe zapadni i jugozapadni smjer (nije prikazano). U terminu 07 UTC model daje snažnu buru, te uslijed skretanja smjera vjetra i promjene brzine nastaje nekoliko linija konvergencije u prizemnom sloju (slika 4.22d) i

na visni 850 hPa plohe (nije prikazano).

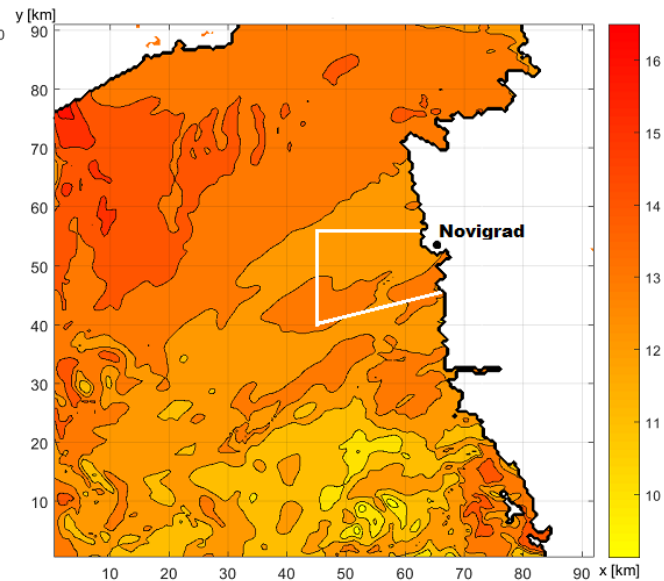


Slika 4.22. Modelirane vrijednosti 30.06.2014. godine za domenu D (vidi sliku 3.2): (a) CAPE u 08 UTC, (b) smicanje vjetrova u sloju 0-6 km u 08 UTC, (c) radarski odraz i polje vjetrova na 10 m u 07 UTC, (d) radarski odraz i polje vjetrova na 10 m u 08 UTC.

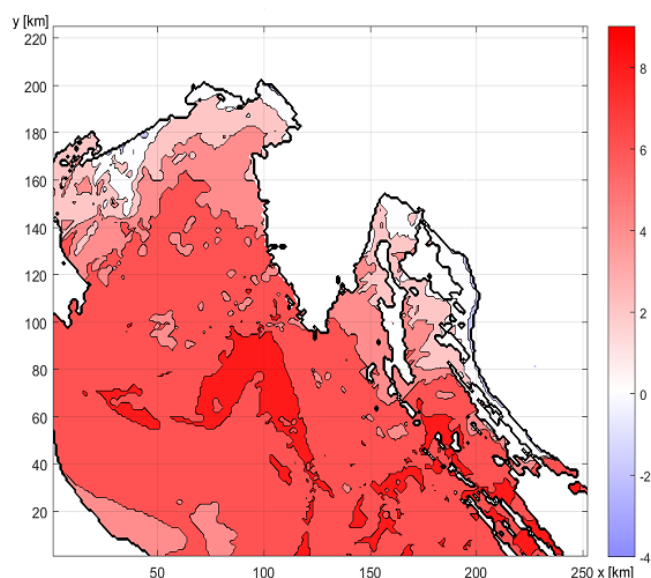
Smicanje je izraženo duž linija konvergencije. Maksimalno modelirano smicanje je 16 m/s u sloju od 0 do 6 km u terminu 08 UTC (slika 4.22b). Za termin 07 UTC SHARPPy daje jako velike vrijednosti smicanja od oko 26 m/s u sloju od 0 do 6 km visine (slika B.11 u Dodatku B).



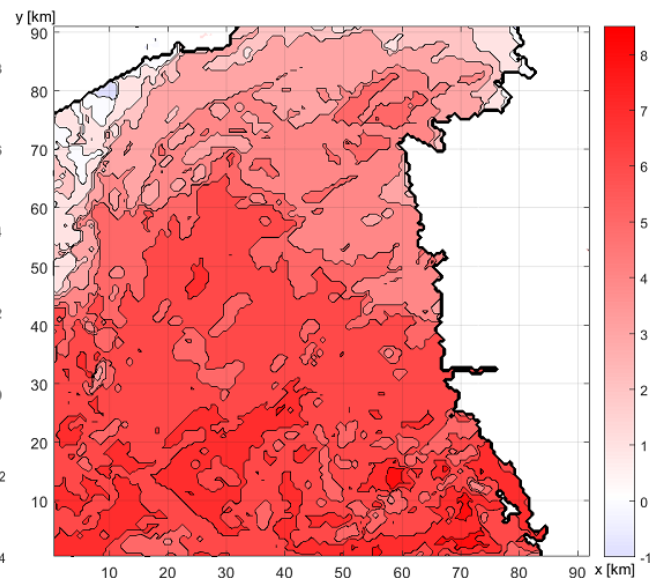
(a) EL-LCL (km), domena D



(b) SST- T_{850} (°C), domena D



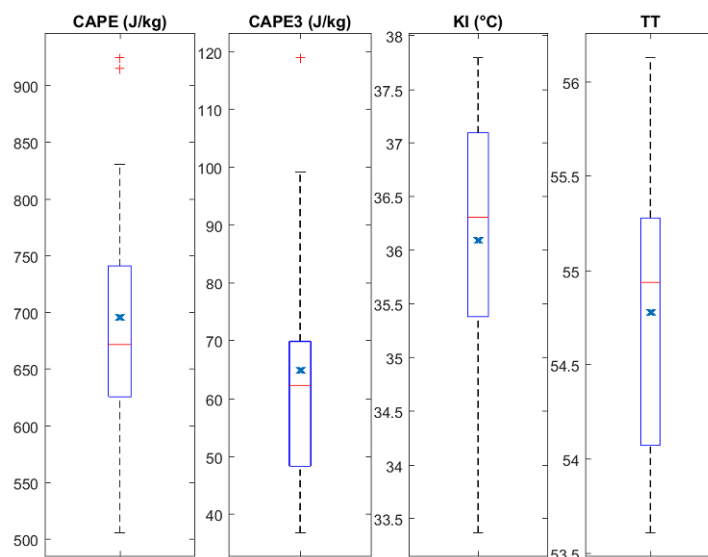
(c) SWI, domena C



(d) SWI, domena D

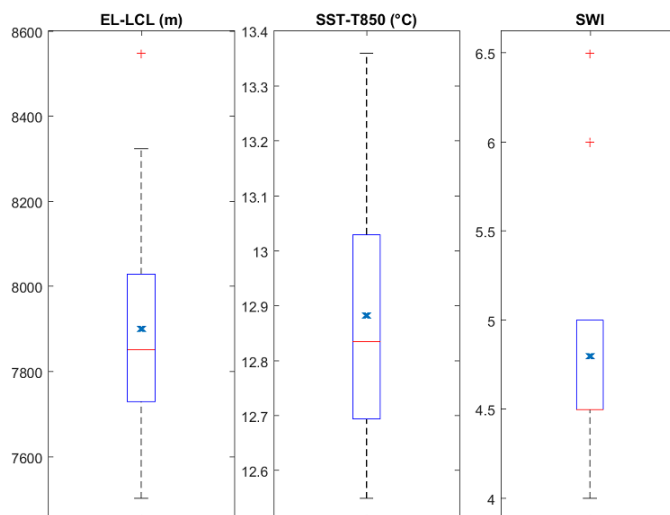
Slika 4.23. Razlike visina EL i LCL, razlike SST i temperature na 850 hPa plohi za domenu D, te vrijednosti SWI za domenu (C) i D u 07 UTC 30.06.2014. godine.

Razlika $EL - LCL$ se na najmanjoj domeni nalazi u rasponu od 3 do 10 km, a uz samu obalu Novigrada razlika $EL - LCL$ je između 7 i 8 km (slika 4.23a). Razlike $SST - T_{850}$ su u rasponu od 9 do 16 °C (slika 4.23b). Polje SWI u ovom slučaju je pozitivno na cijeloj C i D domeni, osim uz obalu Dalmacije i na samom sjeveru Jadrana (slika 4.23c i 4.23d). Ispred novigradske obale SWI vrijednosti su između 4 i 6, a južnije od Novigrada SWI poprima maksimalne vrijednosti (SWI = 8).



Slika 4.24. Indeksi nestabilnosti atmosfere: CAPE, CAPE3, KI i TT za sve pseudo-sondaže iz označenog dijela domene D (vidi sliku 4.23b) u 07 UTC 30.06.2014. godine. Opis prikaza isti je kao na slici 3.3.

Rezultati SHARPPy programa za pseudo-sondaže uz obalu daju sljedeće srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti atmosfere: $CAPE = 696 \text{ J/kg}$, $KI = 36$, $TT = 55$ i $CIN = -56 \text{ J/kg}$ (slika 4.24, CIN nije prikazan). Vrijednosti CAPE-a dobivene SHARPPy programom su znatno veće od modeliranih vrijednosti CAPE-a u 07 UTC koje nisu prikazane, ali se ne razlikuju značajno od onih u 08 UTC uz zapadnu obalu Istre. U odnosu na ostale ljetne slučajeve, ovaj slučaj ima najmanje vrijednosti CAPE-a i najveće apsolutne vrijednosti CIN-a (slika B.1 i B.3 u Dodatku B). KI ima najveću vrijednost u usporedbi s ostalih 9 slučajeva pojave pijavica (slika B.4 u Dodatku B).

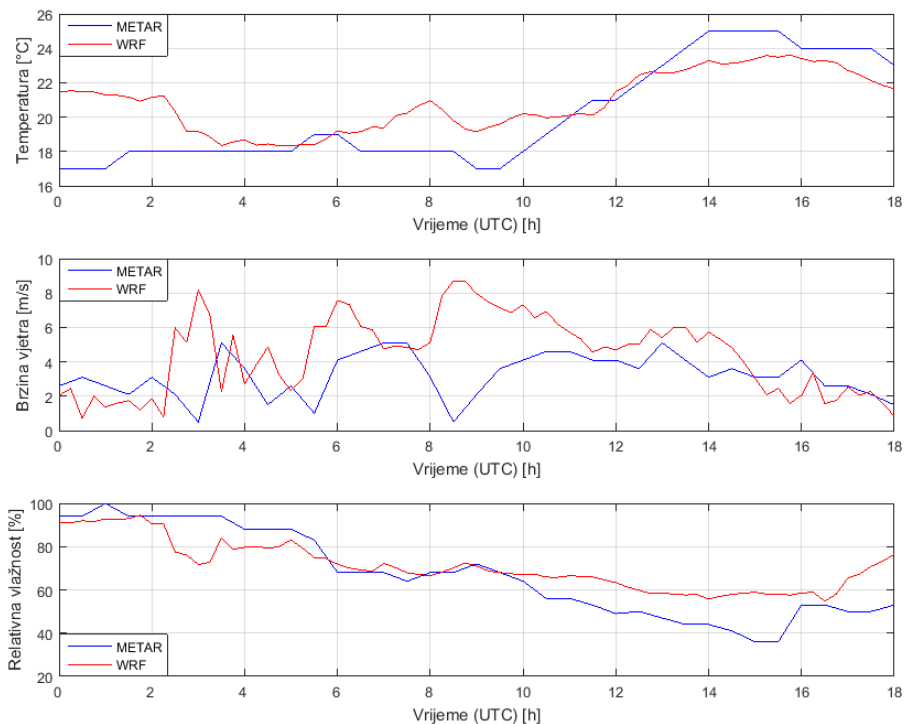


Slika 4.25. Veličine: $EL - LCL$, $SST - T_{850}$ i SWI za sve pseudo-sondaže iz označenog dijela domene D (vidi sliku 4.23b) u 07 UTC 30.06.2014. godine. Opis prikaza isti je kao na slici 3.3.

Na slici 4.25 vidi se da je srednja vrijednost razlike EL i LCL oko 8 km i to je naj-

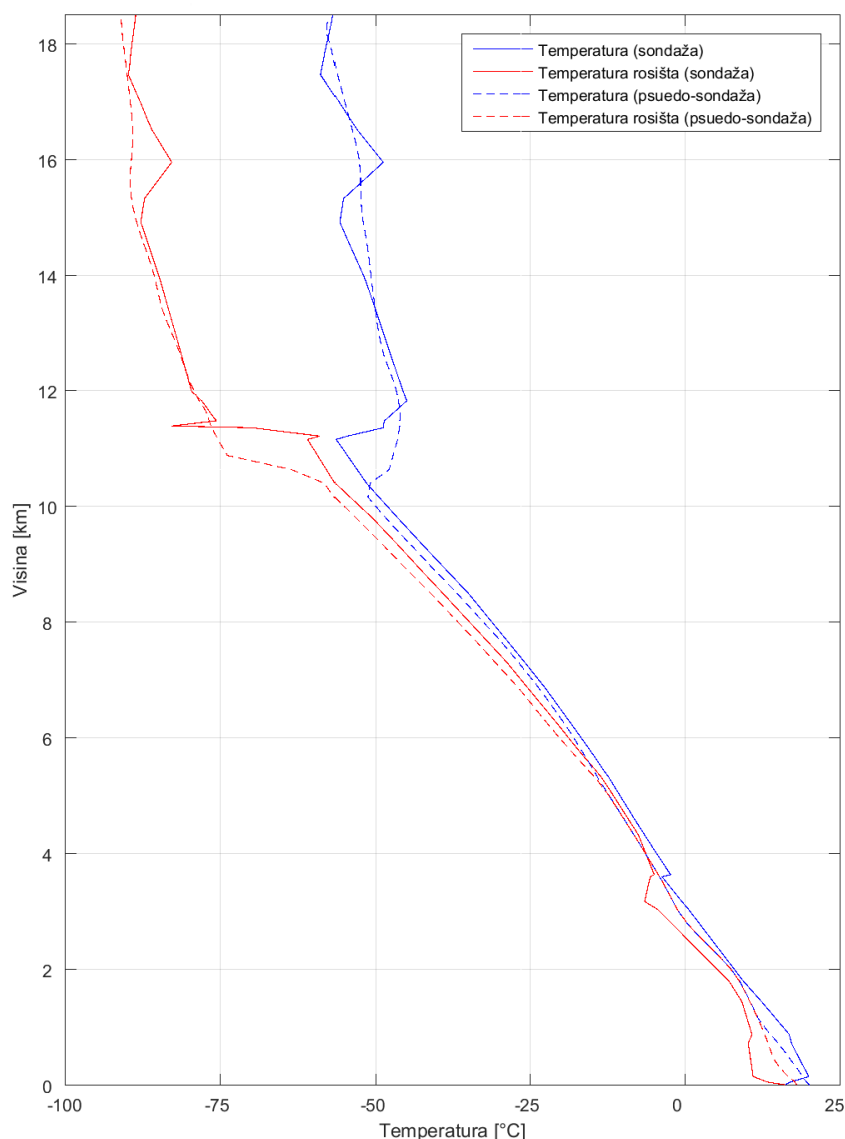
manja dobivena vrijednost u usporedbi s ostalim ljetnim slučajevima pojave pijavica. Razlike SST i T_{850} , oko $13\text{ }^{\circ}\text{C}$, nisu znatno različite od onih dobivenih izvornim algoritmom za termin 07:30 UTC za isti dio najmanje domene (slika 4.25 i 4.23b). SWI je za ovaj slučaj manji nego u ostalim ljetnim slučajevima (slika B.8 u Dodatku B), te se ni on ne razlikuje od vrijednosti SWI dobivenih izvornim algoritmom za kasniji termin.

Provjera uspješnosti simulacije vremenskih uvjeta 30.06.2014. godine napravljena je usporedbom vremenskih nizova METAR mjerenja temperature, brzine vjetra i relativne vlažnosti sa zračne luke Portorož s modelski najbližom točkom (slika 4.26). Modelirani i izmjereni niz temperature se najviše razlikuju u jutarnjim i prijepodnevnim satima. Mjereni i modelirani vjetar se dosta razlikuju, pogotovo u terminu nakon pojave pijavice gdje model predviđa oko 9 m/s veću brzinu. Modelirana relativna vlažnost relativno dobro prati mjerenja tijekom cijelog dana s nešto većim razlikama oko 03 UTC i kasnije u poslijepodnevnim satima.



Slika 4.26. Usporedba METAR podataka sa zračne luke Portorož s podacima modela WRF od 00 UTC do 18 UTC 30.06.2014. godine.

Usporedba radiosondažnih mjerenja i pseudo-sondaža za ovaj slučaj je prikazana za postaju San Pietro Capofiume u terminu 00 UTC na dan pojave pijavice (slika 4.27). Opažena i modelska temperatura se u prva 2 km razlikuju za nekoliko stupnjeva, te se dosta dobro podudaraju do 10 km visine nakon čega modelska počinje rasti prije opažene. Modelska i opažena temperatura rosišta se dosta razlikuju u prva 4 km gdje model predviđa vlažniju atmosferu, nadalje je ista situacija kao i sa temperaturom zraka gdje model prognozira vrh troposfere na visinama manjim od 11 km .



Slika 4.27. Usporedba sondaže i pseudo-sondaže za San Pietro Capofiume u 00 UTC 30.06.2014. godine.

Pijavice kod Komiže

Zimske pijavice iako nisu česte, nisu neuobičajene, a u dva dana za redom u siječnju ove godine, vrlo brzo nakon snažne pijavice početkom siječnja koja je napravila veliku štetu u Splitu, zabilježeno je prema svjedočenjima očevidaca čak 6 pijavica. Dvije 13.01., jedna kod Murtera, druga između Drvenika i Čiova, a dan poslije, 14.01.2016. stanovnici Visa uočili su ih čak četiri. Nešto poslije 10 h (09:15 UTC), između otoka Biševa, Brusnika i Sv. Andrije (Sveca) u kratkom vremenu formirale su se pijavice koje su trajale oko 20 min. Klasificirane su kao one “lijepog vremena”. Pseudo-sondaže za C i D domenu analizirane su 1 h prije pojave pijavica tj. u 08:15 UTC. Područje unutar kojeg je izdvojeno 20 pseudo-sondaža za proračun SHARPPy programom prikazano je na slici A.3b u Dodatku A.

Rezultati SHARPPy programa za pseudo-sondaže uz obalu daju sljedeće srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti atmosfere: $CAPE = 81.8 \text{ J/kg}$, $KI = -14$, $TT = 32$ i $CIN = -294.7 \text{ J/kg}$. Usporedbom s vrijednostima danima u tablicama 1-3, vidi se da srednje vrijednosti KI i TT indeksa ne upućuju na grmljavinsko nevrijeme, a vrijednosti $CAPE$ -a, premda male, još uvijek upućuju na nestabilno vrijeme. Negativna vrijednost KI znači da su T_{850} i T_{700} ili jednake nuli ili negativne, što nije neobično zimi. Na slikama B.1 i B.2 u Dodatku B može se uočiti da se medijani parametara $CAPE$ i $CAPE3$ ne razlikuju mnogo, dakle gotovo cijeli $CAPE$ se nalazi u prva 3 km . Primjećujemo da je CIN u ovom slučaju najveći po apsolutnoj vrijednosti u odnosu na ostale (slika B.3 u Dodatku B). Ovakve vrijednosti parametara nestabilnosti ne upućuju na pojavu konvekcije, no kao što je već ranije navedeno, nije moguće prognozirati konvekciju niti pojave pijavica promatrajući samo indekse nestabilnosti. Stoga promatramo ostale parametre poput razlika $SST - T_{850}$, $EL - LCL$ i smicanja u različitim slojevima. Na slikama A.3b u Dodatku A i B.7 u Dodatku B vidi se da je srednja vrijednost dobivena SHARPPy programom $15.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, što se podudara s rezultatima izvornog algoritma za označeno područje domene D, ujedno i najveća vrijednost ove razlike u usporedbi s ostalim slučajevima. Smicanje je također pogodovalo stvaranju uvjeta povoljnih za formiranje pijavice, koje u sloju od 0 do 6 km iznosi 32.5 m/s (slika B.11 u Dodatku B), ovo su vrijednosti usporedive s maksimalnim koje su Renko i sur. (2016) dobili za pijavice “lijepog vremena”. Uzrok velikih razlika $SST - T_{850}$ i velikih vrijednosti smicanja je bila sinoptička situacija gdje po visini advektirani hladan zrak ($\overline{T_{850}} = -0.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$) dolazi nad toplu morsku površinu ($\overline{SST} = 15.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$). SHARPPy daje razliku EL i LCL od 1.4 do 3.3 km što je minimum u odnosu na ostale (slika B.6 u Dodatku B) i slaže se s rezultatima izvornog algoritma na slici A.3a u Dodatku A. SWI se na označenom području domene D kreće između 0 i 1 (slika A.3d u Dodatku A), te iako je po vrijednosti SWI indeksa mala vjerojatnost za pojavu pijavice ona i dalje postoji.

4.1.3 Sinoptički tip: Zatvorena visinska ciklona (CLOSED)

U skladu s tablicom 4 iz prethodnog poglavlja, dva slučaja pojave pijavica dogodila su se za vrijeme premještanja duboke ciklone nad Jadranom: pijavice pred Hvarom 24.09.2015. godine i sljedećeg dana pijavice pred Dubrovnikom 25.09.2015. godine.

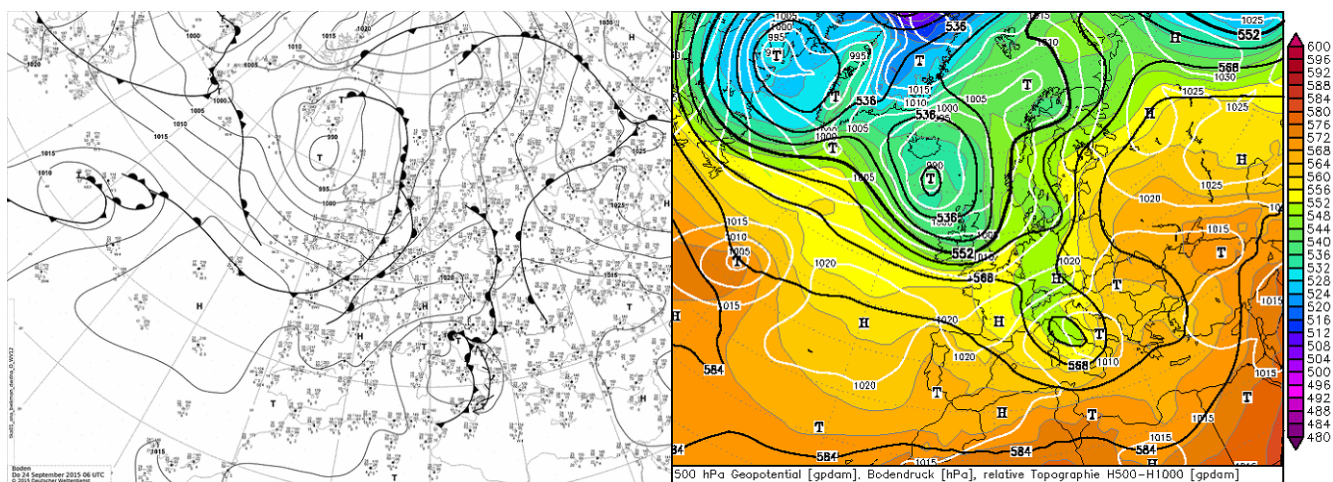
Pijavice kod Hvara

U okolini grada Hvara 24.09.2015. godine u jutarnjim satima uočene su čak četiri pijavice. Prva se zadržala na moru, druge dvije su se istodobno stvorile pred hvarskom lukom, gdje su jednoj jedrilici rastrgale jedra, a četvrta je stigla s mora do kopna. Ova pijavica je izravno pogodila hotel *Bodul* u Uvali Križa, gdje je načinila znatnu materijalnu štetu (slika 4.28).

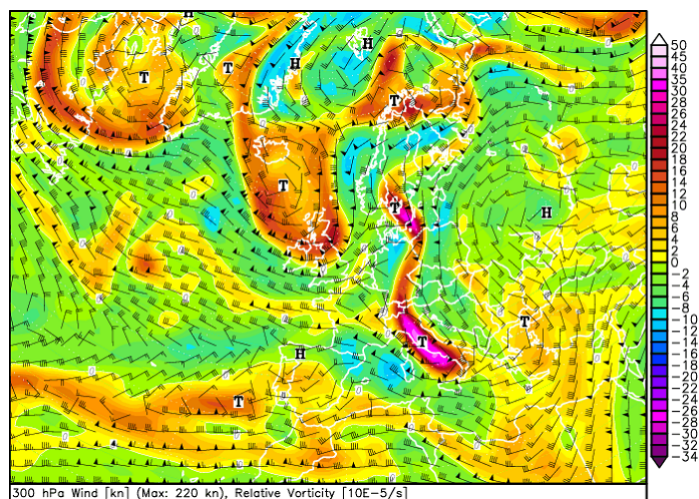


Slika 4.28. Pijavica na Hvaru i šteta koju je prouzročila (lijevo, snimio: Jakša Kuzmičić) i procjena putanja 4 pijavice 24.09.2015. godine (desno, izvor: Crometeo).

Relativno intenzivna visinska ciklona (engl. *cut-off low*) premještala se tog jutra i prijepodneva iz srednje Italije u Dalmaciju pri čemu se i prizemno preko Jadrana premješta centar sniženog tlaka zraka zajedno s frontalnim sustavom (slika 4.29). U srednjim slojevima mlazna struja kruži južnom stranom visinske ciklone (slika 4.30).

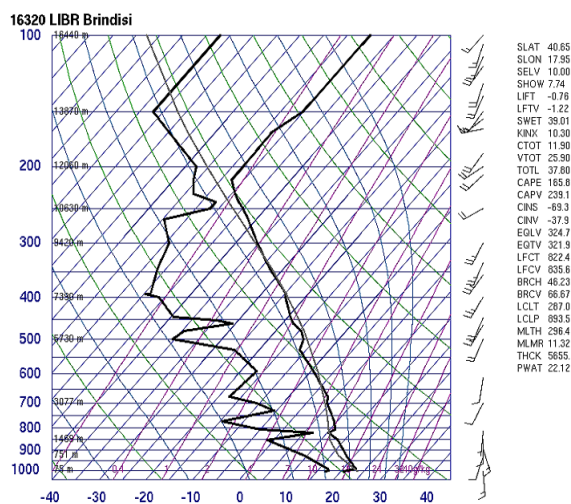


Slika 4.29. Prizemna sinoptička karta (lijevo), karta apsolutne topografije 500 hPa (crne linije) i relativne topografije 500/1000 hPa (osjenčano u boji) (desno) u 06 UTC 24.09.2015. godine (izvor: <http://www.wetter3.de>).



Slika 4.30. Mlazna struja i relativna vrtložnost na 300 hPa plohi (osjenčano) u 06 UTC 24.09.2015. godine (izvor: <http://www.wetter3.de>).

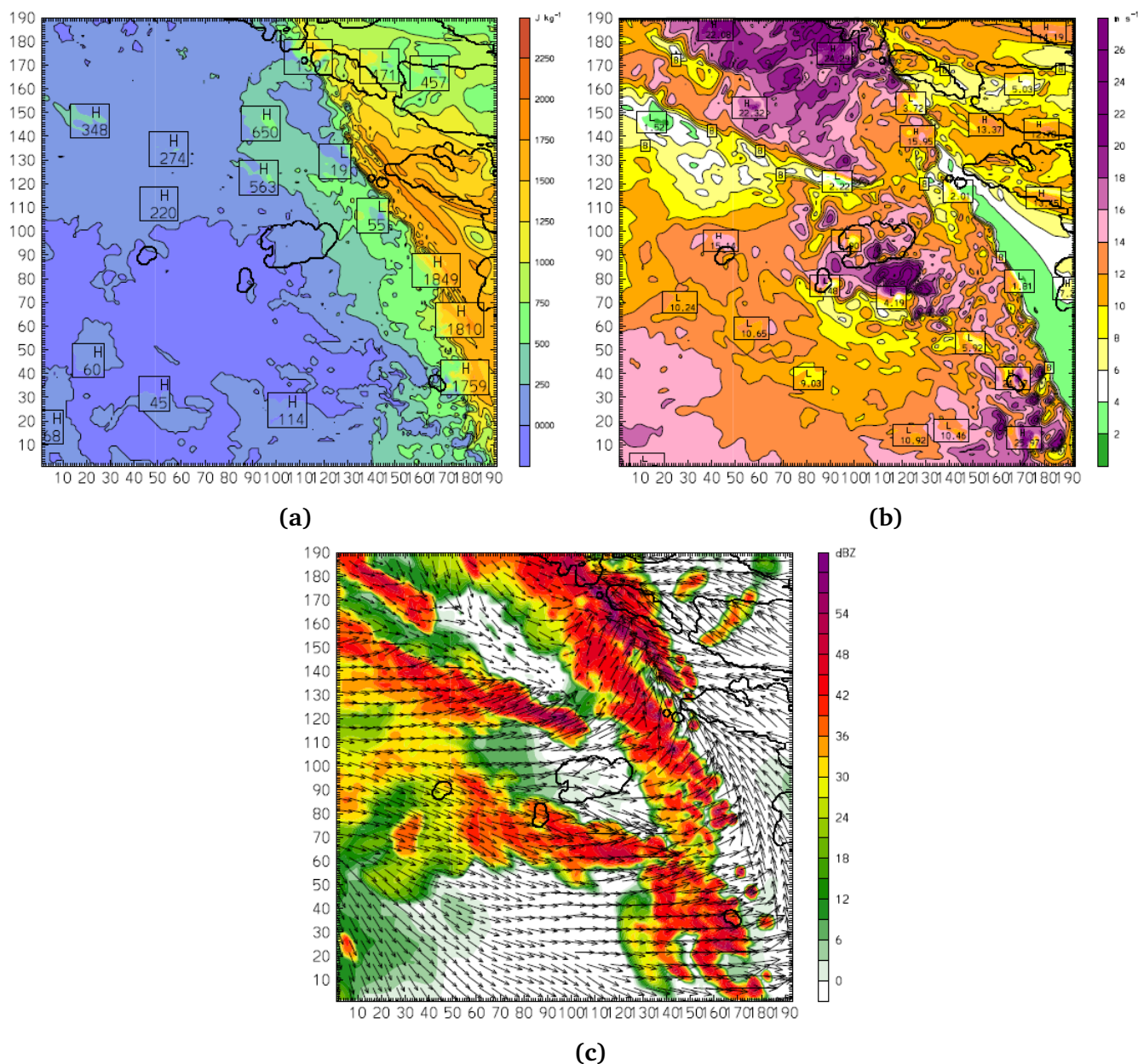
Nad Jadranom, posebice u Dalmaciji javlja se s premještanjem frontalnih sustava izražena linija konvergencije u nižim slojevima atmosfere, na lijevoj strani slike 4.29 nacrtana kao linija nestabilnosti. Na prednjoj strani ciklone povlači se s juga vlažan i topao zrak, dok se na stražnjoj strani ciklone u srednjim slojevima advektira hladan zrak. Preklapanje vlažnog zraka u donjim slojevima s po visini izraženim stopama ohlađivanja ukazuje na potencijalno nestabilnu atmosferu (slika 4.31).



Slika 4.31. Termodinamički dijagram radiosondaže za Brindisi u 00 UTC 24.09.2015. godine (izvor: <http://weather.uwyo.edu>).

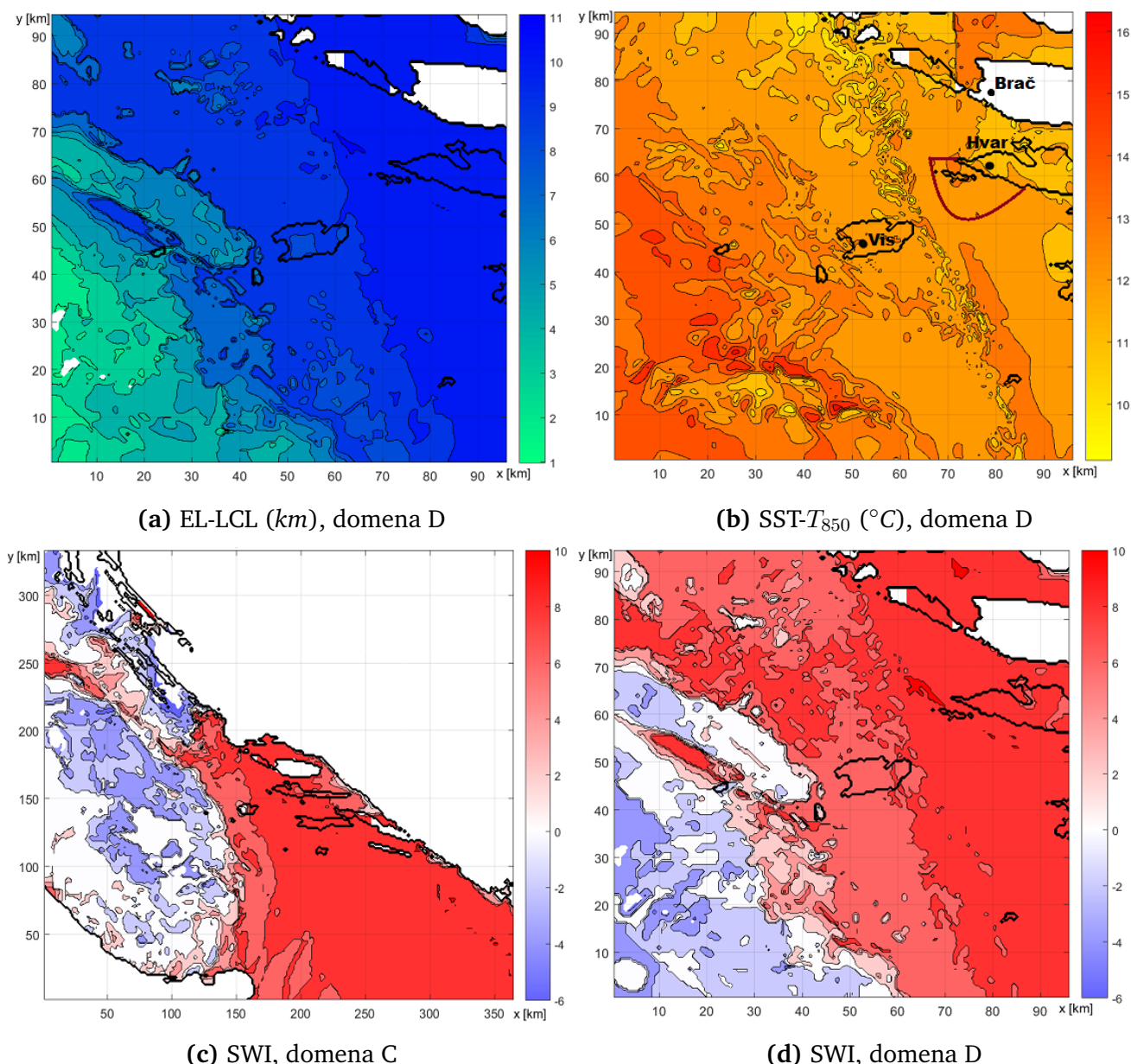
Promatrane pijavice nastale su oko 07 UTC i na osnovu LINET podataka klasi-ficirane su kao pijavice povezane s grmljavinskim olujama. Pseudo-sondaže za C i D domenu analizirane su 1/2 i 1 h prije pojave pijavica tj. u 06:00 i 06:30 UTC. Područje unutar kojeg je izdvojeno 20 pseudo-sondaža za proračun SHARPPy pro-gramom prikazano je na slici 4.33b.

U području linije konvergencije, koja je jasno vidljiva na polju vjetra na 10 m i na polju reflektivnosti oblaka gdje vrijednosti idu i do 60 dBZ, zabilježene su vrlo visoke vrijednosti CAPE-a (do 2000 J/kg, a SHARPy daje i veće, čak 2400 J/kg) (slika 4.32a i 4.32c). Sve ovo ukazuje na snažnu konvekciju koja je potvrđena prisutnošću mnogobrojnih munja detektiranih LINET sustavom (slika 4.34).



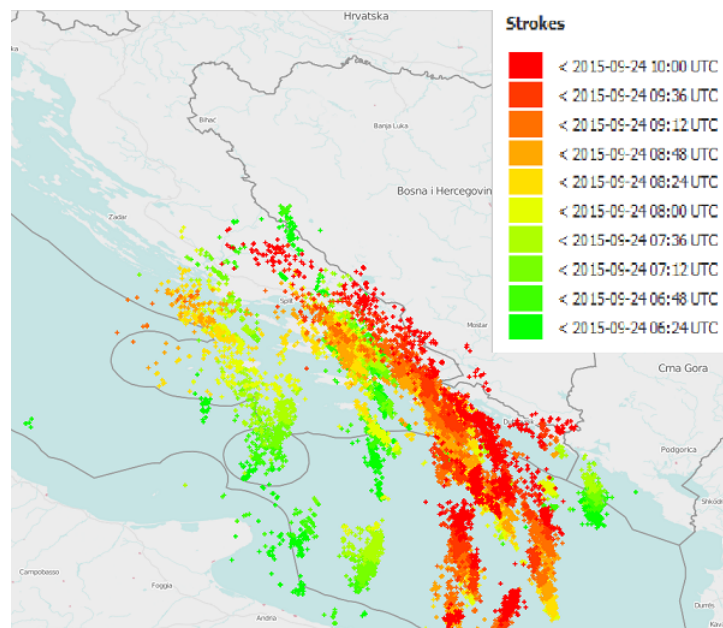
Slika 4.32. Modelirane vrijednosti u 07 UTC 24.09.2015. godine za domenu D (vidi sliku 3.2): (a) CAPE, (b) smicanje vjetra u sloju 0-3 km, (c) radarski odraz i polje vjetra na 10 m.

Smicanje je izraženo po iznosu i smjeru osobito duž linije konvergencije i hladne fronte (slika 4.32b i 4.32c). Vrijednosti smicanja u sloju od 0 do 3 km idu do 26 m/s, a kod pojave pijavica ovakve vrijednosti su češće u dubljem sloju od 0 do 6 km.



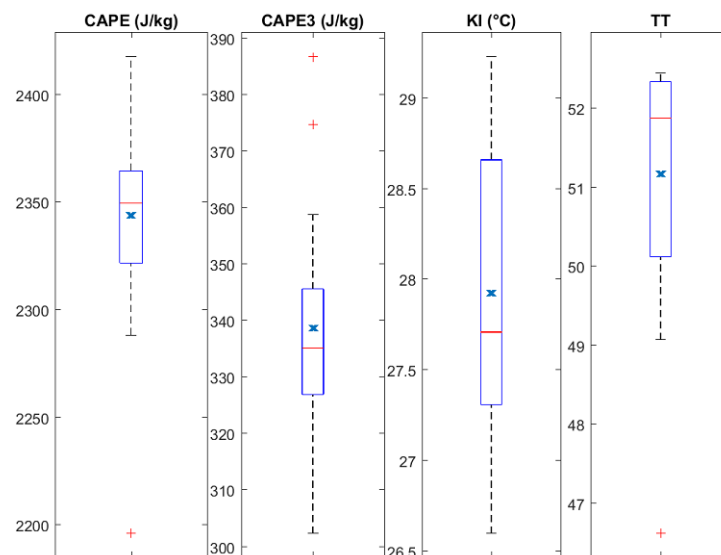
Slika 4.33. Razlike visina EL i LCL, razlike SST i temperature na 850 hPa plohi za domenu D, te vrijednosti SWI za domenu C i D u 06:30 UTC 24.09.2015. godine.

Razlika EL i LCL je u jugozapadnom dijelu izrazito manja (1 - 3 km) nego u preostalom dijelu (8 - 11 km) najmanje domene (slika 4.33a) upravo zbog prolaska hladne fronte što je u skladu sa slikama refleksivnosti oblaka i vrijednosti CAPE-a. Razlike $SST - T_{850}$ su na cijeloj domeni dosta raznoliko raspoređene, raspon im je između 10 - 16 $^{\circ}\text{C}$ (4.33b). Polje SWI vrijednosti također prati pomicanje hladne fronte što je uočljivije na većoj C domeni, pa su tako vrijednosti iza fronte negativne ili nula, dok su ispred nje pozitivne i dosta brzo rastu do maksimalne moguće (slika 4.33c i 4.33d).



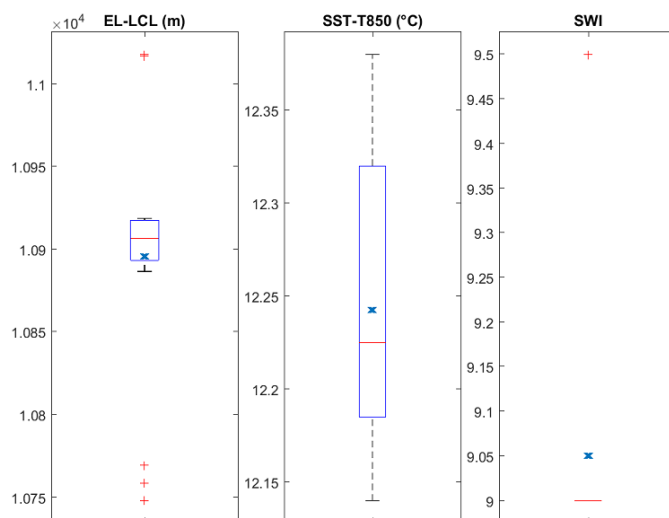
Slika 4.34. Učestalosti pojave munja za interval 06-10 UTC 24.09.2015. godine.

Rezultati SHARPPy programa za pseudo-sondaže uz obalu daju sljedeće srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti atmosfere: $CAPE = 2343.9 \text{ J/kg}$, $KI = 28$, $TT = 51$ i $CIN = 0 \text{ J/kg}$ (slika 4.35, CIN nije prikazan). Ovaj slučaj ima maksimalan CAPE i CAPE3, te minimalan CIN u usporedbi s drugim slučajevima (slike B.1, B.2 i B.3 u Dodatku B).



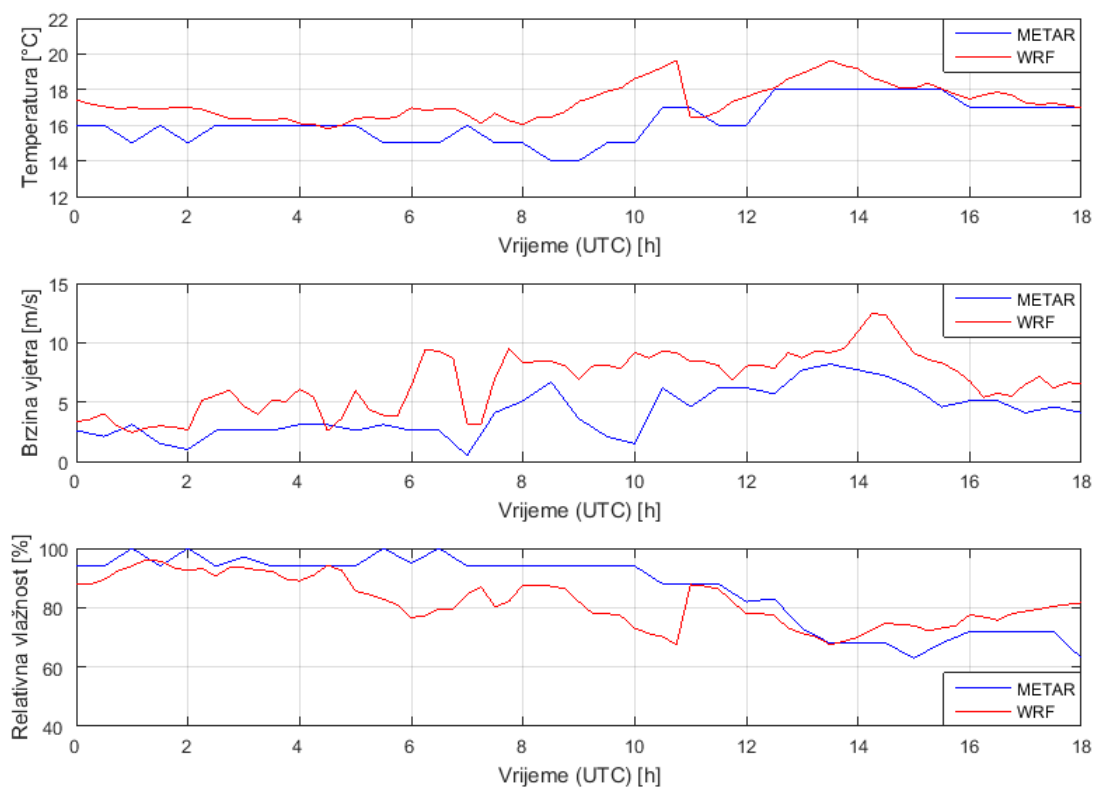
Slika 4.35. Indeksi nestabilnosti atmosfere: CAPE, CAPE3, KI i TT za sve pseudo-sondaže iz označenog dijela domene D (vidi sliku 4.33b) u 06 UTC 24.09.2015. godine. Opis prikaza isti je kao na slici 3.3.

Također, u usporedbi s dosadašnjim istraživanjima za područje Jadrana u kojima su eksplicitno navedene vrijednosti CAPE-a (Sioutas i Keul (2007); Renko i sur. (2016)), vrijednost za ovaj slučaj je veća od tih. Isto tako vrijednosti CAPE-a u prva 3 km (maksimalna $\sim 400 \text{ J/kg}$) su znatno veće od onih u gore spomenutim radovima koje ne prelaze 300 J/kg za pijavice povezane s grmljavinskim olujama. Uz ovoliku nestabilnost nije neočekivano na slici 4.36 uočiti da je srednja vrijednost razlike EL i LCL jednaka 10.9 km , ujedno je ovo najveća vrijednost u usporedbi s drugima u ovom radu (slika B.6 u Dodatku B). Gotovo sve vrijednosti SWI u 20 odabranih točaka su 9, osim dvije koje su 9.5. Sa svih slika u Dodatku B možemo zaključiti da je ovo slučaj s najhomogenijim poljima gotovo svih veličina.



Slika 4.36. Veličine: $EL - LCL$, $SST - T_{850}$ i SWI za sve pseudo-sondaže iz označenog dijela domene D (vidi sliku 4.33b) u 06 UTC 24.09.2015. godine. Opis prikaza isti je kao na slici 3.3.

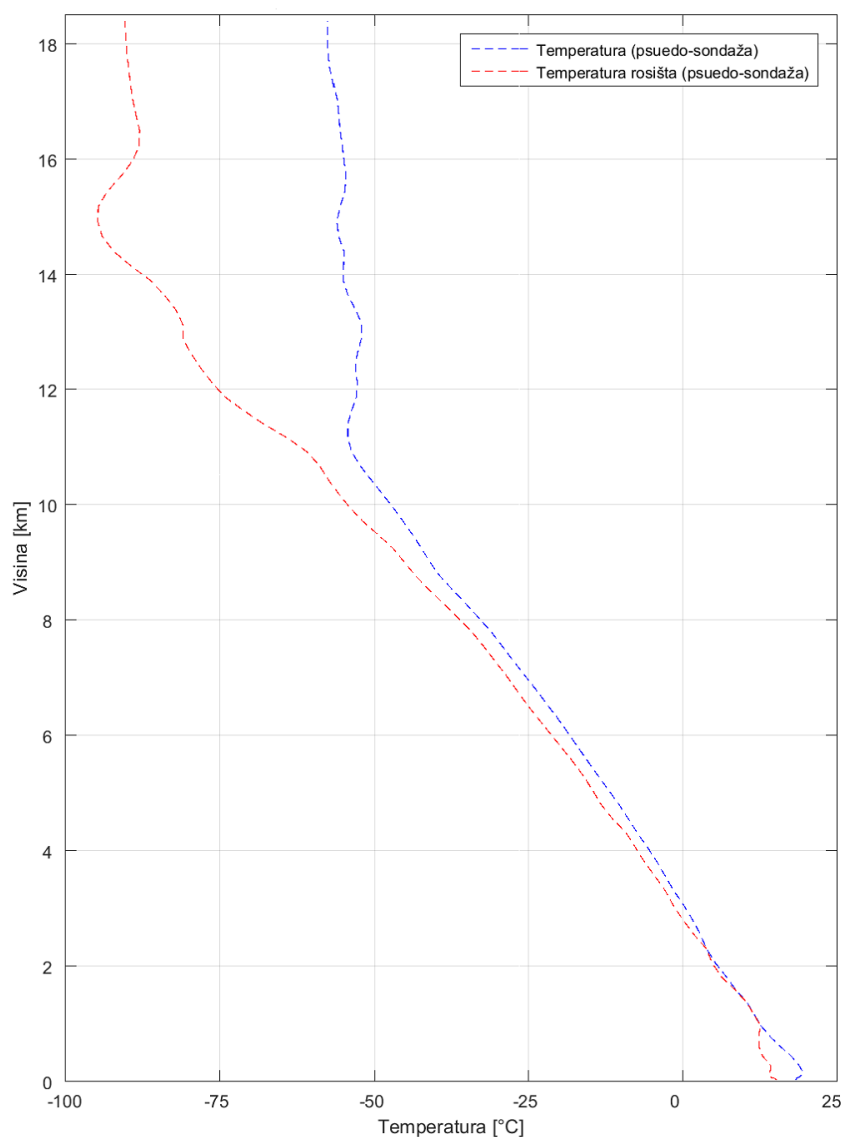
Provjera uspješnosti simulacije vremenskih uvjeta 24.09.2015. godine napravljena je usporedbom vremenskih nizova METAR mjerenja temperature, brzine vjetera i relativne vlažnosti sa zračne luke Zadar - Zemunik s modelski najbližom točkom (slika 4.37). Modelirani niz temperature daje do $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ veću temperaturu od opažene, no u terminima prije pojave pijavice te su razlike upola manje.



Slika 4.37. Usporedba METAR podataka sa zračne luke Split s podacima modela WRF od 00 UTC do 18 UTC 24.09.2015. godine.

Model precjenjuje prizemni vjetar do 7 m/s , a oko termina pojave pijavice bilježi nagli pad i nakon 07 UTC nagli porast brzine koji je u manjem intenzitetu i opažen. Kao i u prethodnim slučajevima, mjerena i modelirana relativna vlažnost se bolje podudaraju nego prethodna dva niza, osim od 05 UTC do 11 UTC kad su razlike nešto manje od 20 %.

Usporedba radiosondažnih mjerenja i pseudo-sondaža za ovaj slučaj nije bila moguća zbog nedostatka radiosondažnih podataka za Zadar u terminu 00 UTC na dan pojave pijavice. Stoga je na slici 4.38 nacrtana samo modelska temperatura zraka i temperatura rosišta, te se na njoj uočava visok stupanj vlažnosti u cijeloj troposferi.



Slika 4.38. Pseudo-sondaža za Zadar u 00 UTC 24.09.2015. godine.

Pijavica kod Dubrovnika

Nakon što su na području otoka i grada Hvara dan prije zabilježene pijavice, 25. rujna pod utjecajem iste visinske ciklone čak 6 pijavica i ljevkastih oblaka pred Dubrovnikom uočio je “lovac na oluje” Daniel Pavlinović. Pijavice su se pojavile oko 14:30 h po lokalnom vremenu te su se s oblačnim sustavom premještale paralelno s obalom i niti jedna od njih nije ušla nad kopno.

Pijavice i ljevkastih oblaci su opaženi u 12:30 UTC, a cijela pojava je trajala oko 30 minuta, pored toga zabilježeno je atmosfersko električno pražnjenje pa ove pijavice klasificiramo kao one povezane s grmljavinskim olujama. Pseudo-sondaže za C i D domenu analizirane su 1 h prije pojave pijavica tj. u 11:30 UTC. Područje unutar kojeg je izdvojeno 20 pseudo-sondaža za proračun SHARPy programom prikazano je na slici A.4b u Dodatku A.

Rezultati SHARPPy programa za pseudo-sondaže uz obalu daju sljedeće srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti atmosfere: $CAPE = 774.5 \text{ J/kg}$, $KI = 25$, $TT = 49$ i $CIN = -0.2 \text{ J/kg}$. Znatno niže vrijednosti CAPE-a i CAPE-a u prva 3 km te nešto niže vrijednosti KI i TT indeksa nego prethodnog dana (slika B.1, B.2, B.4 i B.5 u Dodatku B) posljedica su premještanja prizemnog frontalnog poremećaja na istok kontinenta (nije prikazano). Zbog zadržavanja hladnog zraka u sklopu visinske ciklone nad toplim morem vrijednosti razlike $SST - T_{850}$ su oko $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$, što je $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ više nego prethodnog dana što se vidi na slici A.4b u Dodatku A i na slici B.7 u Dodatku B. Atmosfera je i dalje nestabilna, no ne kao prethodnog dana stoga je razlika EL i LCL na gotovo cijeloj najmanjoj domeni (slika A.4a u Dodatku A) uključujući i samu obalu uz Dubrovnik (slika B.6 u Dodatku B) između 7 i 7.5 km. Zbog ovakvih uvjeta vrijednosti SWI su uz obalu između 3 i 5 te nešto veće prema otvorenom moru (slika A.4d u Dodatku A).

4.1.4 Sinoptički tip: Dolina u obliku kratkog vala (SWT)

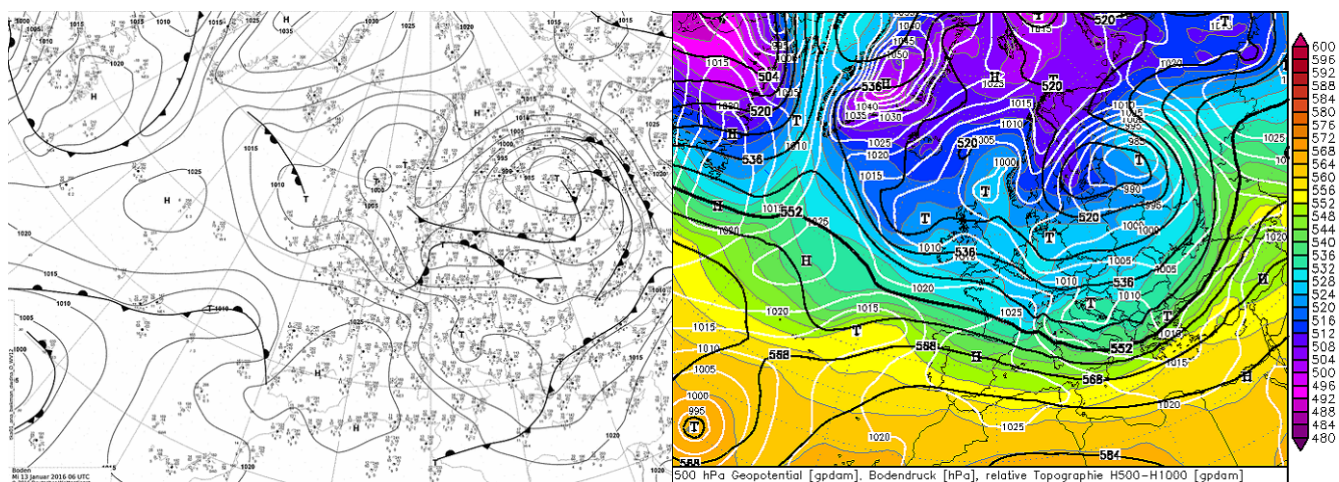
Dva slučaja pojave pijavica dogodila su se za vrijeme brzog premještanja doline u obliku kratkog vala nad Jadranom: pijavica kod Murtera 13.01.2016. godine i pijavice kod Malog Lošinja 11.02.2016. godine.

Pijavica kod Murtera

U jutarnjim satima 13.01.2016. godine iz mjesta Jezera na otoku Murteru uočena je pijavica. Držala se mora i nije ušla nad kopno (slika 4.39). Tih dana duboka dolina protezala se preko većeg dijela Europe, od sjevernog Atlantika sve do Sredozemlja (slika 4.40). Hladan zrak po visini pritjecao je sa sjevera i sjeverozapada nad relativno toplu morsku površinu stvarajući izražene stope ohlađivanja (slika 4.41).

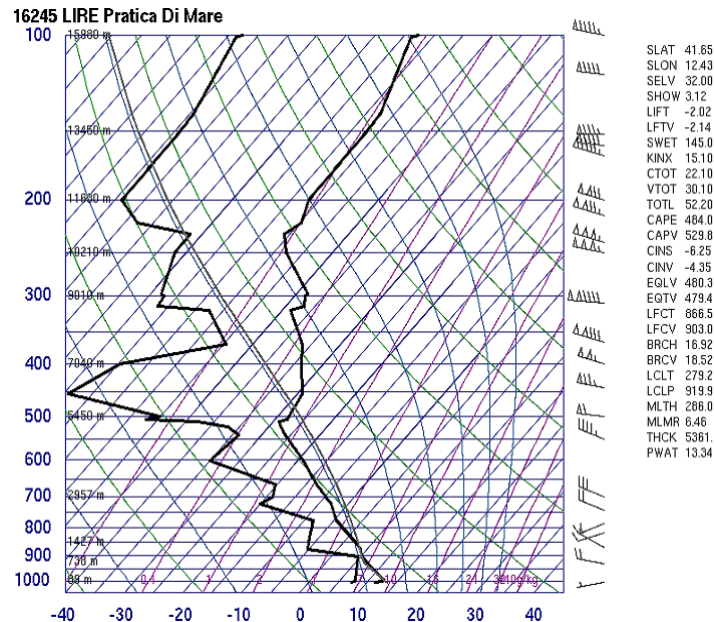


Slika 4.39. Pijavica kod otoka Murtera 13.01.2016. godine (snimio: Kristijan Plenča).

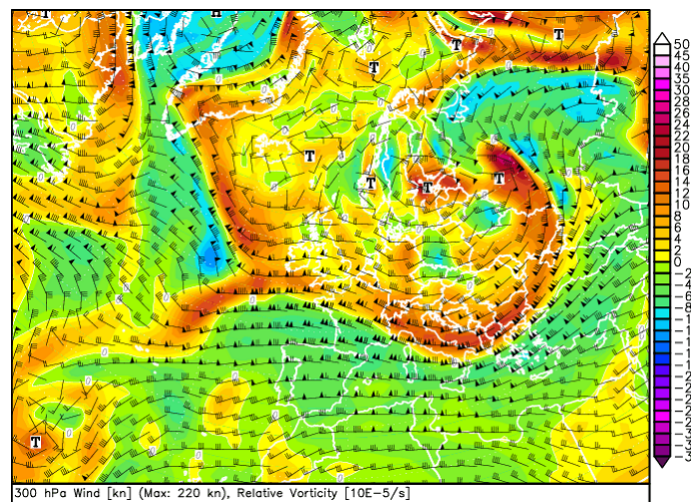


Slika 4.40. Prizemna sinoptička karta (lijevo), karta apsolutne topografije 500 hPa (crne linije) i relativne topografije 500/1000 hPa (osjenčano u boji) (desno) u 06 UTC 13.01.2016. godine (izvor: <http://www.wetter3.de>).

Po visini je srednji i južni dio Jadrana u ta dva dana bio na rubu visinske doline i prevladavalo je zapadno i sjeverozapadno strujanje (slika 4.42). Prizemno nije bilo izraženih baričkih sustava kao niti izraženijeg vjetera i u ovom slučaju su uz već spomenutu nestabilnost lokalni uvjeti doprinijeli razvoju pijavica.



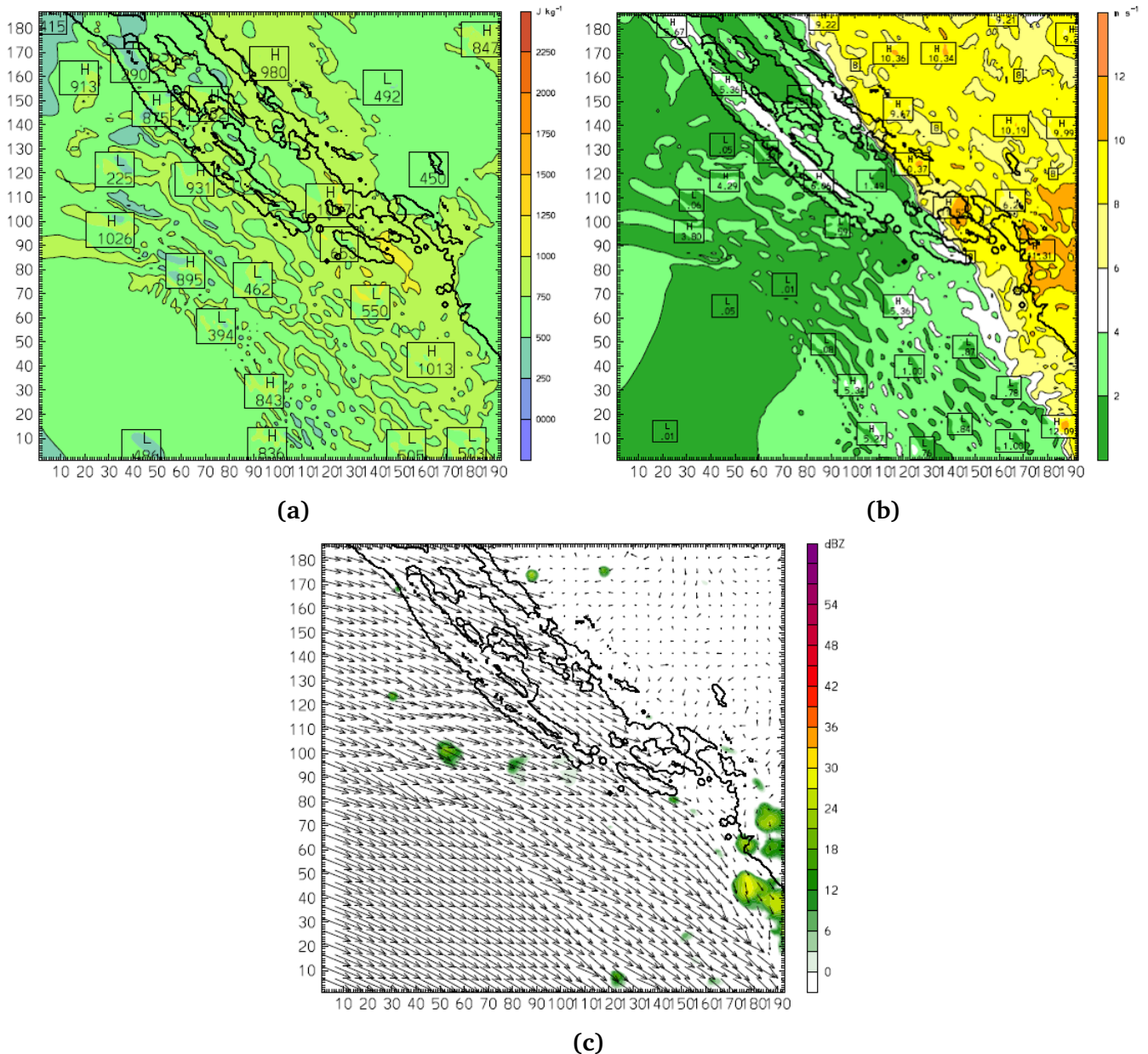
Slika 4.41. Termodinamički dijagram radiosondaže u Rimu u 00 UTC 13.01.2016. godine (izvor: <http://weather.uwyo.edu>).



Slika 4.42. Mlazna struja i relativna vrtložnost na 300 hPa plohi (osjenčano) u 06 UTC 13.01.2016. godine (izvor: <http://www.wetter3.de>).

Promatrana pijavica nastala je oko 08:30 UTC i na osnovu LINET podataka klasificirana je kao pijavica povezana s grmljavinskim olujama. Pseudo-sondaže za C i D domenu analizirane su 1 h prije pojave pijavica tj. u 07:30 UTC. Područje unutar kojeg je izdvojeno 20 pseudo-sondaža za proračun SHARPPy programom prikazano je na slici 4.44b.

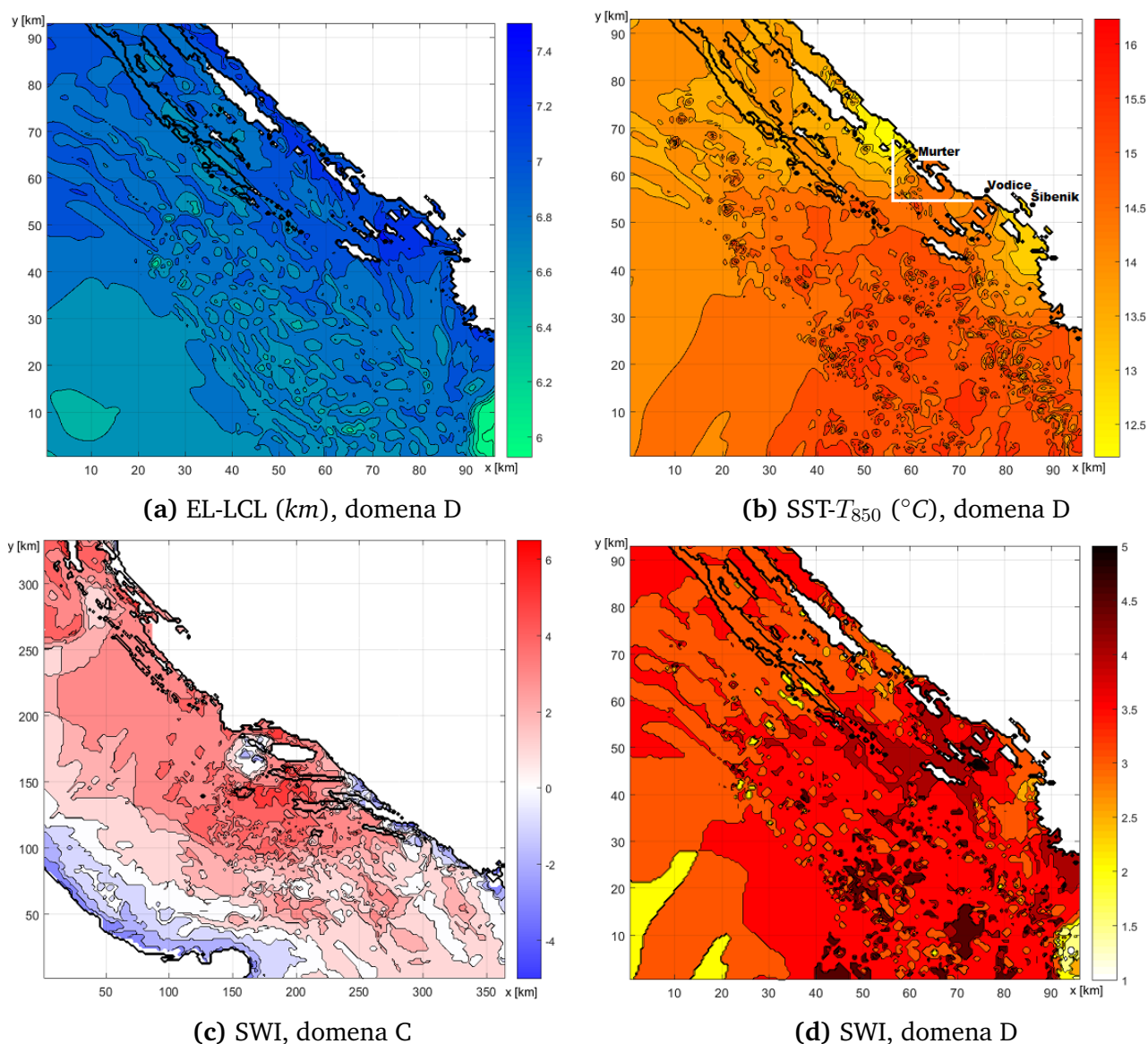
Vrijednosti CAPE-a su vrlo raznolike, od minimalnih 225 J/kg do maksimalnih 1057 J/kg upravo u blizini Murtera, te daju naslutiti da je atmosfera nestabilna (slika 4.43a). Za smicanje u prva 3 km model daje u obalnom dijelu vrijednosti oko 10 m/s (slika 4.43b) pola sata prije pojave pijavice, a SHARPy srednju vrijednost smicanja od 6.5 m/s u donjih 1 km za 20 točaka neposredno uz otok Murter 1 h prije pijavice (slika B.10 u Dodatku B).



Slika 4.43. Modelirane vrijednosti u 08 UTC 13.01.2016. godine za domenu D (vidi sliku 3.2): (a) CAPE, (b) smicanje vjetra u sloju $0\text{--}3 \text{ km}$, (c) radarski odraz i polje vjetra na 10 m .

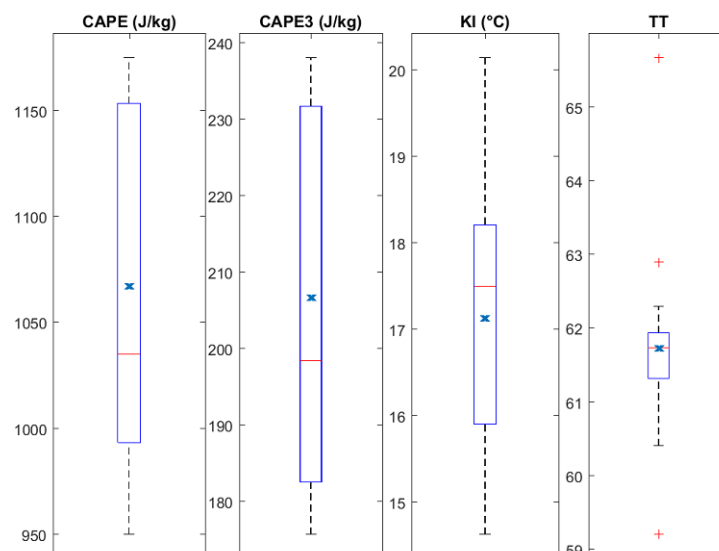
U sjeverozapadnoj struji koja je vidljiva i u prizemnom vjetru stiže hladan zrak (slika 4.43c), a more je još razmjerno toplo jer SST je oko 15°C (nije prikazano). Razlika $SST - T_{850}$ na velikom dijelu najmanje domene je između 14 i 15°C (slika

4.44b), a uz razliku EL i LCL od 6 do 8 km (slika 4.44a) stvoreni su povoljni uvjeti za nastanak pijavice tj. na cijeloj najmanjoj domeni vrijednosti SWI su pozitivne (4.44d).



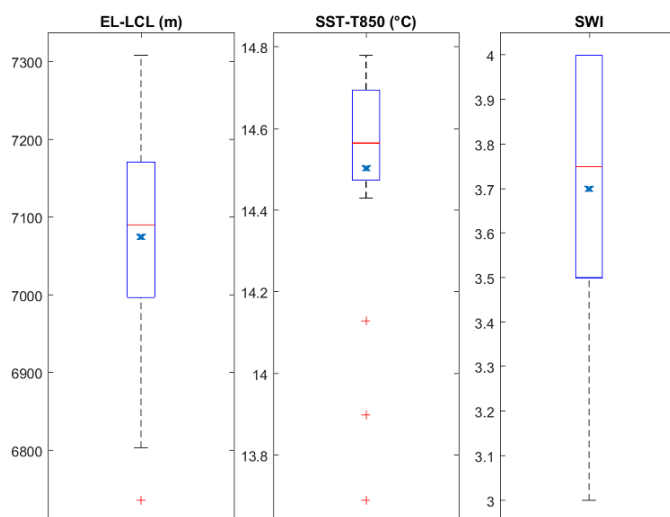
Slika 4.44. Razlike visina EL i LCL, razlike SST i temperature na 850 hPa plohi za domenu D, te vrijednosti SWI za domenu (C) i D u 07:30 UTC 13.01.2016. godine.

Rezultati SHARPPy programa za pseudo-sondaže uz obalu daju sljedeće srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti atmosfere: $CAPE = 1067.4 \text{ J/kg}$, $KI = 17$, $TT = 62$ i $CIN = -3.8 \text{ J/kg}$ (slika 4.45, CIN nije prikazan). Ovaj slučaj ima maksimalan CAPE i CAPE3 u usporedbi s drugim zimskim slučajevima (slike B.1 i B.2 u Dodatku B). Rezultati CAPE slažu se s onima dobivenim modelom (slika 4.43a). Vrijednosti KI su dosta niske no i dalje prognoziraju mogućnost grmljavinske oluje ($14.6 \leq KI \leq 20.2$), dok su vrijednosti TT indeksa za ovaj slučaj najveće u odnosu na ostale slučajeve (slika B.5 u Dodatku B) i uz to sugeriraju veliki potencijal za jake oluje ($59.2 \leq TT \leq 65.7$).



Slika 4.45. Indeksi nestabilnosti atmosfere: CAPE, CAPE3, KI i TT za sve pseudo-sondaže iz označenog dijela domene D (vidi sliku 4.44b) u 07:30 UTC 13.01.2016. godine. Opis prikaza isti je kao na slici 3.3.

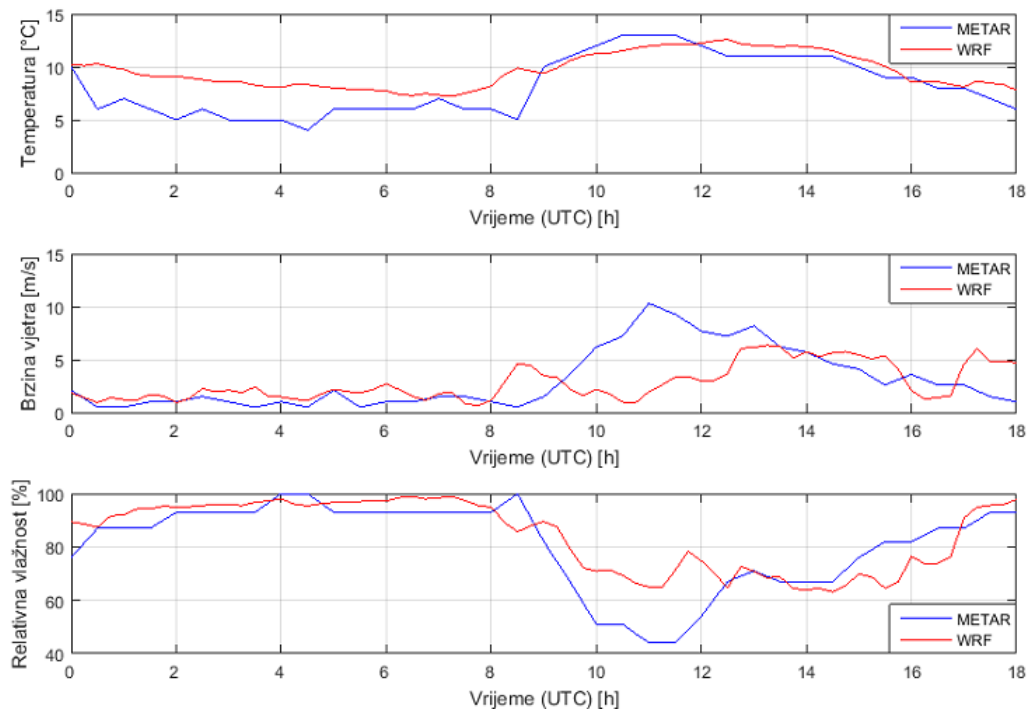
Srednja vrijednost razlike EL i LCL je 7 km, a $SST - T_{850}$ je 14.5 °C (slika 4.46), što je u skladu s vrijednostima izvornog algoritma (slika 4.44a i 4.44b). Gotovo sve vrijednosti SWI u 20 odabranih točaka su 3 i 4.5, ovo su ujedno i najveće vrijednosti indeksa dobivene za zimski slučaj pojave pijavice (slika B.8 u Dodatku B).



Slika 4.46. Veličine: $EL - LCL$, $SST - T_{850}$ i SWI za sve pseudo-sondaže iz označenog dijela domene D (vidi sliku 4.44b) u 07:30 UTC 13.01.2016. godine. Opis prikaza isti je kao na slici 3.3.

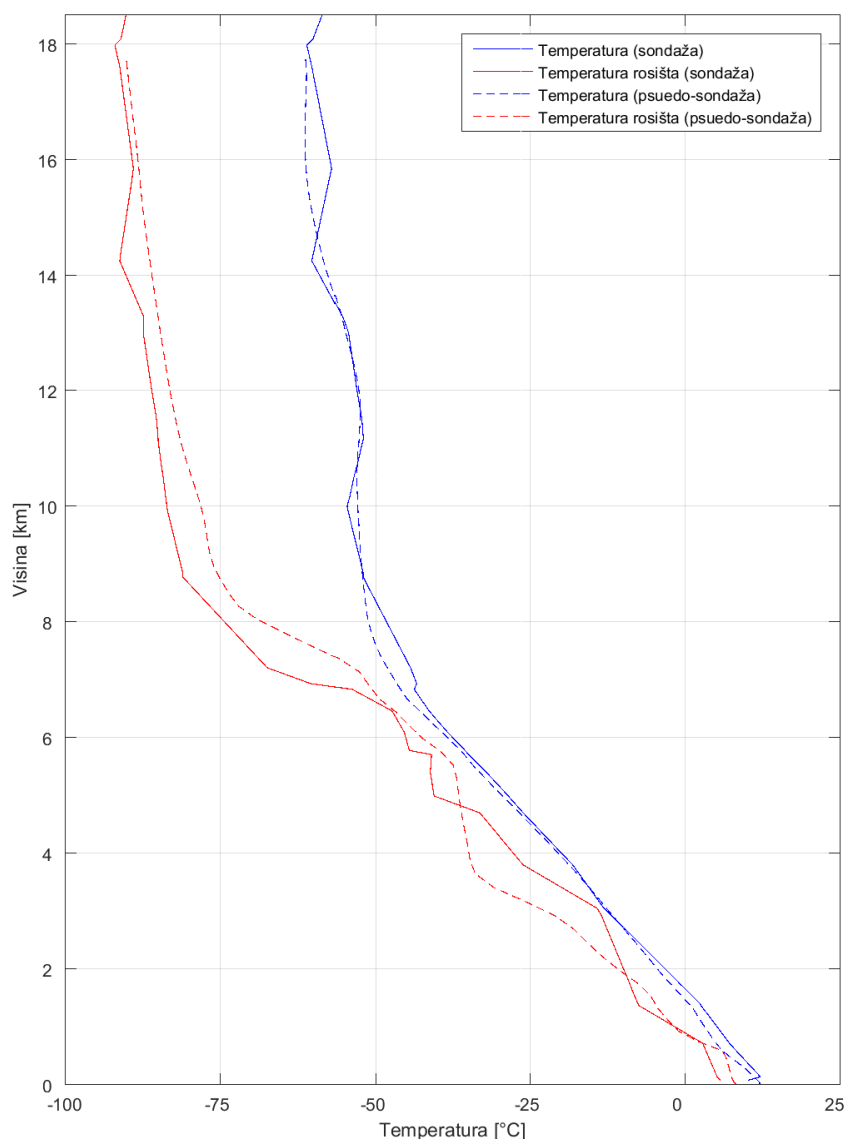
Provjera uspješnosti simulacije vremenskih uvjeta 13.01.2016. godine napravljena je usporedbom vremenskih nizova METAR mjerenja temperature, brzine vjetera i relativne vlažnosti sa zračne luke Zadar - Zemunik s modelski najbližom točkom (slika 4.47). Modelirani niz temperature početkom dana daje veće temperature zraka (do 4 °C), no nakon 09 UTC razlike mjerene i modelske temperature zraka su gotovo

zanemarive u nastavku dana. Modelirani vjetar je pak početkom dana gotovo jednak mjerenom, no nakon 08 UTC dolazi do naglog porasta mjerelog vjetra te razlike postaju veće od 5 m/s, da bi se nakon 13 UTC razlike u brzini vjetra smanjile. Slična je situacija i s relativnom vlažnosti: do 08 UTC razlike nisu značajne, nakon toga mjerena naglo opada, a modelska prati trend pada, no ne za isti postotak, te se ponovno nakon 13 UTC razlike smanjuju.



Slika 4.47. Usporedba METAR podataka sa zračne luke Zadar - Zemunik s podacima modela WRF od 00 UTC do 18 UTC 13.01.2016. godine.

Usporedba radiosondažnih mjerenja i pseudo-sondaža (slika 4.48) za ovaj slučaj je prikazana za Zadar u terminu 00 UTC na dan pojave pijavice. Mjerena i modelska temperatura zraka se jako dobro podudaraju na gotovo svim visinama kao i u svim prethodnim slučajevima. Mjerena i modelska temperatura rosišta se razlikuju, a ponajviše u sloju od 2 do 5 km, gdje model predviđa suši zrak i u sloju od 6.5 km pa naviše, gdje model predviđa nešto vlažniju atmosferu nego što je izmjereno.



Slika 4.48. Usporedba sondaže i pseudo-sondaže za Zadar u 00 UTC 13.01.2016. godine.

Pijavice kod Malog Lošinja

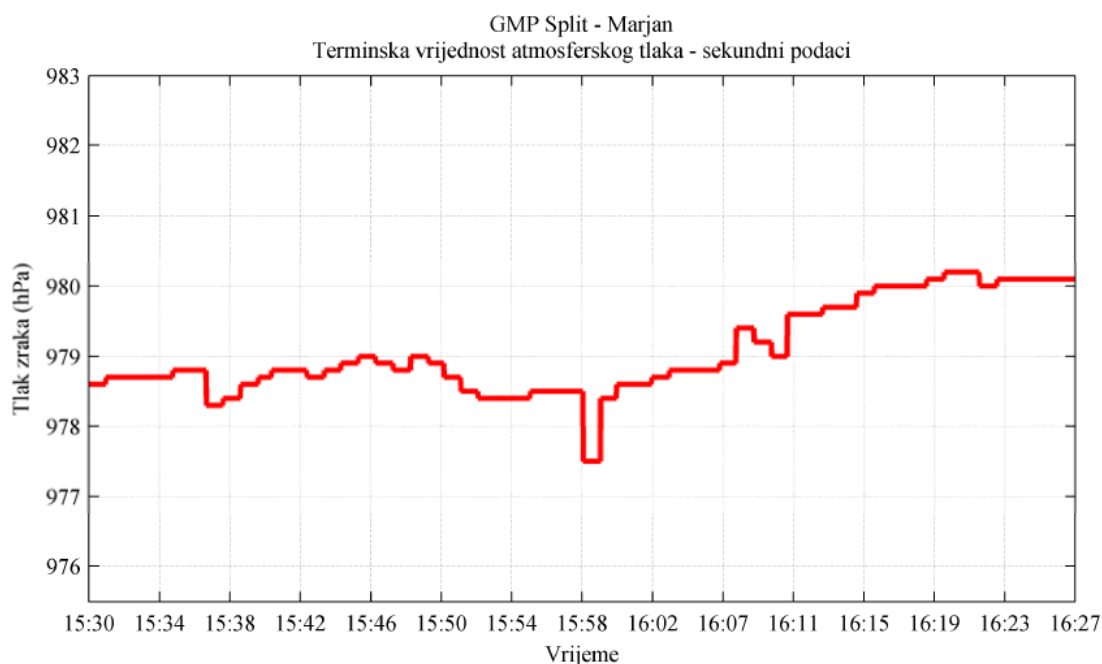
Tijekom poslijepodneva 11.02.2016. godine razvilo se čak 6 pijavica kod Malog Lošinja, no niti jedna od njih nije ušla na kopno i prouzročila štetu. Prostrana dolina tog dana se protezala od sjevernog Atlantika prema srednjoj Europi i sjevernom Sredozemlju i na njezinom rubu preko Italije i Jadrana premještala se kratkovalna dolina (nije prikazano), stoga je sinoptički tip vremena koji prethodi pijavici SWT.

Pijavice i ljevkaсти oblaci su opaženi u 13 UTC, a cijela pojava je trajala oko 30 min, pored toga na području pojave pijavica nije zabilježeno atmosfersko električno pražnjenje pa ove pijavice klasificiramo kao one "lijepog vremena". Pseudo-sondaže za C i D domenu analizirane su 1 h prije pojave pijavica tj. u 12 UTC. Područje unutar kojeg je izdvojeno 20 pseudo-sondaža za proračun SHARPy programom prikazano je na slici A.5b u Dodatku A.

Rezultati SHARPPy programa za pseudo-sondaže uz obalu daju sljedeće srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti atmosfere: $CAPE = 17.6 \text{ J/kg}$, $KI = 21$, $TT = 53$ i $CIN = -196.8 \text{ J/kg}$. Vrijednosti CAPE-a i CAPE-a u prva 3 km su zanemarive i ujedno najmanje u usporedbi s ostalim slučajevima (slika B.1 i B.2 u Dodatku B). Kao i u prethodnom slučaju niske vrijednosti KI, a visoke vrijednosti TT indeksa (slika B.4 i B.5 u Dodatku B). Razlika EL i LCL je jako mala, od 1.6 do 2.9 km, jedina niža u ovom radu je zabilježena za slučaj pijavice kod Komiže (slika B.6 u Dodatku B). Dok su vrijednosti $SST - T_{850}$ među većim, točnije oko $14.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (slika B.7 u Dodatku B). Kao posljedica male razlike EL i LCL, vrijednosti SWI su u gotovo svih 20 točaka jednake 0, osim u četiri u kojima su negativne, a to je ujedno i jedini slučaj gdje su zabilježene negativne vrijednosti SWI za dio najmanje domene neposredno u blizini mjesta s kojeg je pijavica uočena (slika B.8 u Dodatku B). Prema svim pokazateljima, može se zaključiti da su najbitniju ulogu u razvoju pijavice imali lokalni uvjeti. Ono što je odigralo ključnu ulogu u nastanku ovih pijavica je smicanje vjetra, a time i vrtložnost u nižem sloju atmosfere te niska baza oblaka (oko 350 km). Uzrok snažnom smicanju je premještanje plitke ciklone preko Italije tijekom noći i jutra pri čemu do sjevernog Jadrana stiže hladan zrak, pa jugo i južni vjetar okreće na zapadnjak i sjeverozapadnjak. U prilog ovome idu vrijednosti smicanja dobivene SHARPPy programom koje se kreću od 12 do visokih 20 m/s u sloju od 0 do 1 km (slika B.10 u Dodatku B).

4.2 Procjena maksimalnog intenziteta konvektivnog vrtloga pijavice

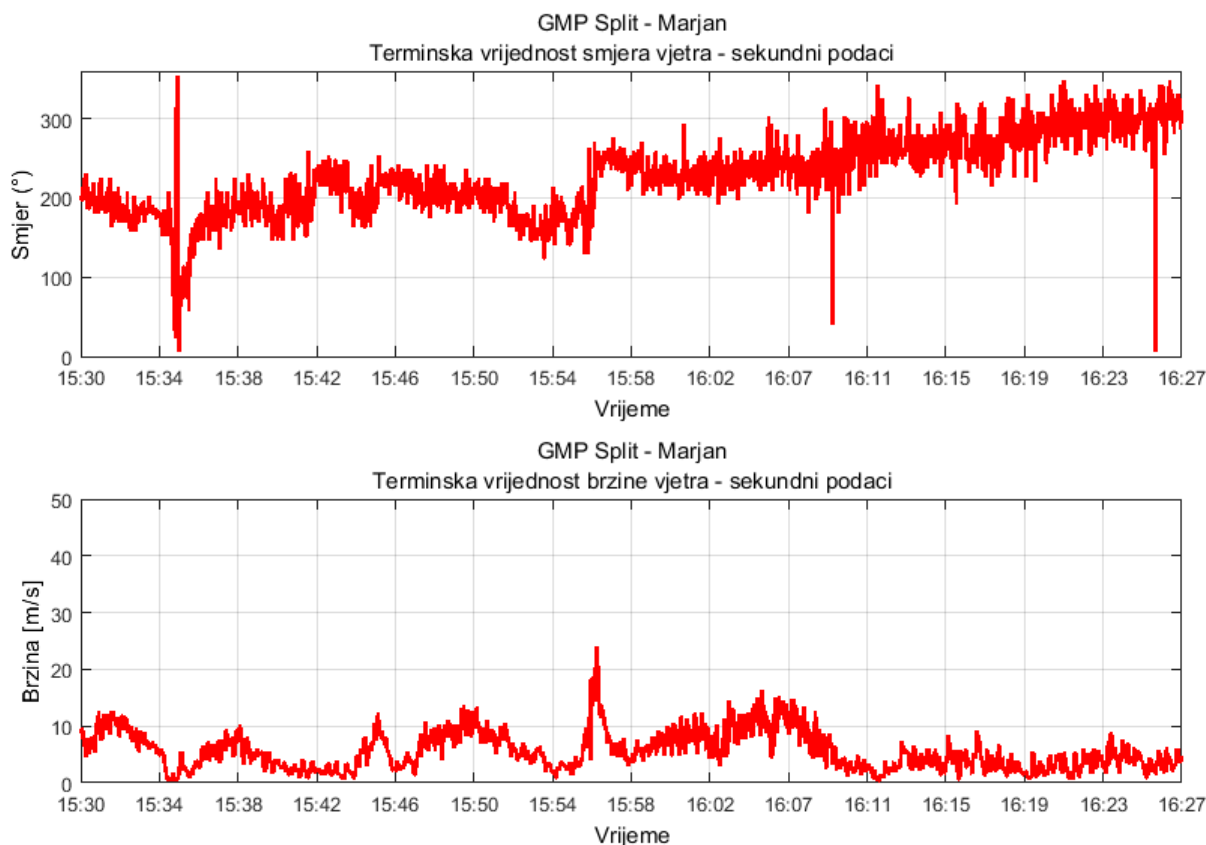
Pijavica koja se razvila početkom 2016. godine u Splitu jedna je od rijetkih čiju putanju kretanja karakterizira ulazak na kopno relativno blizu meteorološke postaje. Njezin prolazak mjerio se u svim meteorološkim parametrima te je zabilježen nagli pad tlaka u 15:58 sati po lokalnom vremenu (slika 4.49). Motritelj je procijenio visinu baze oblaka na 300 m, a pijavica je stigla iz smjera jugozapada (236°) uz najjači udar vjetra od 24 m/s (slika 4.50).



Slika 4.49. Tlak na GMP Split - Marjan 6. siječnja 2016. godine.

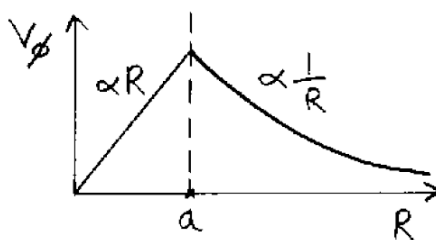
S obzirom da je nemoguće simulirati pojavu same pijavice i njezinu tangencijalnu brzinu mezoskalnim modelom, cilj je testirati jednostavnu teorijsku metodu računanja maksimalne tangencijalne brzine (v_a) prema Renno i Bluestein (2001). Nadalje, usporedit će se rezultati primjenjene teorije na mjerenja i na WRF model za ovaj rijetki događaj. Renno i Bluestein (2001) su se fokusirali na termodinamičke konvektivne procese odgovorne za stvaranje pada tlaka unutar pijavice. Pritom su pretpostavili pijavicu u kvazi-stacionarnom stanju (gubitak i unos energije su u ravnoteži) te su zanemarili ostale dinamičke procese koji stvaraju i pojačavaju vertikalnu vrtložnost.

U prvoj aproksimaciji, kako je već navedeno u uvodnom poglavlju, tangencijalno strujanje pijavice može se aproksimirati ciklostrofičkim strujanjem koje je opisano jednadžbom (1.2). Prema (1.2), brzina vjetra je određena razlikom tlaka duž radijusa pijavice koji ovisi samo o termodinamičkim veličinama. U stvarnosti opaženi gradijent tlaka je veći od onog potrebnog za ciklostrofičku ravnotežu zbog radijalnog uvlačenja zraka prema centru pijavice.



Slika 4.50. Smjer i brzina vjetra na GMP Split - Marjan 6. siječnja 2016. godine.

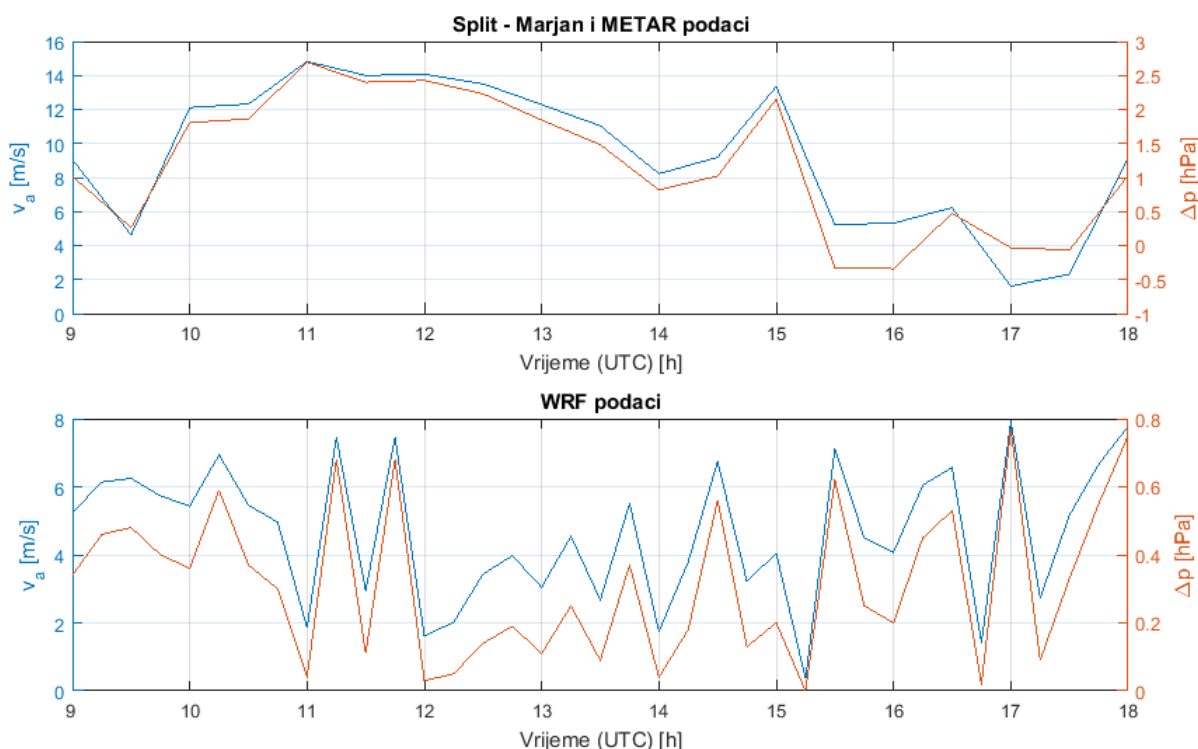
Profil tangencijalne brzine pijavice je kao na slici 4.51, tj. brzina je proporcionalna radijusu vrtloga unutar samog vrtloga te maksimum postiže na njegovom rubu, a izvan vrtloga brzina opada obrnuto proporcionalno radijusu (npr. Schweisov, 1981).



Slika 4.51. Profil tangencijalne brzine kod vrtloga pijavice.

Za račun je potreban iznos tlaka u samom središtu pijavice te temperatura i tlak okoline na maksimalnoj udaljenosti na kojoj se osjeća utjecaj vrtloga. Tlak izmjeren na automatskoj postaji Split - Marjan je tretiran kao onaj u središtu pijavice (iako nije u potpunosti), a METAR podaci tlaka i temperature sa zračne luke Split su tretirani kao oni na maksimalnoj udaljenosti na kojoj se osjeća utjecaj pijavice. Pijavica se na automatskoj postaji pojavila oko 15 UTC, a vrijednosti v_a su izračunate za period od 6 h prije i 3 h nakon pojave pijavice za minimalne vrijednosti tlaka zraka u deset-minutnom terminu (slika 4.52). Isti postupak je ponovljen za izlazne rezultate WRF

modela za točke koje odgovaraju položaju splitskih postaja.



Slika 4.52. Maksimalna tangencijalna brzina vrtloga pijavice i razlika tlaka duž radijusa pijavice na GMP Split - Marjan u periodu od 09 - 18 UTC 06.01.2016. godine.

Ovaj jednostavan model pokazuje nagli porast tangencijalne brzine (na temelju mjerenja) u trenutku prolaska pijavice u blizini postaje. Brzine prelaze 13 m/s a odgovaraju razlici u tlaku od 2.15 hPa . Prema dobivenim vrijednostima u okolini postaje puhao je umjereno jak vjetar, no izmjereni vjetar i šteta nastala prolaskom pijavice ukazuje na vjetar većih brzina. Vrijednost tlaka zraka u središtu pijavice je zasigurno bila znatno manja od gore prikazanih (slika 4.49), odnosno maksimalna tangencijalna brzina je bila veća (slika 4.52). Renno i Bluestein (2001) su koristeći kompleksniji izraz i uz mnoge aproksimacije dobili za slabe pijavice tangencijalnu brzinu od 25 m/s koja se razvija kao posljedica razlike tlaka od 6.5 hPa . Za razliku od mjerenja, razlike tlakova iz numeričkog WRF modela ne ukazuju na pojavu pijavice.

Primjena ovog jednostavnog teorijskog modela ipak podcjenjuje opažene brzine vjetra i razliku tlaka te pokazuje da termodinamički parametri (pri tome ne uvažavajući vodenu paru) nisu bili dovoljni za opis ove zimske pijavice, već je potrebno uzeti u obzir i dinamičke procese (npr. smicanje vjetra). Nažalost, meteorološki modeli velike razlučivosti još uvijek nisu u mogućnosti pružiti precizne informacije o razlici tlaka između centra pijavice i njenog okoliša te dati procjenu maksimalnog intenziteta konvektivnog vrtloga pijavice.

5 Zaključci

U ovom radu analizirani su sinoptički i mezoskalni uvjeti koji su prethodili pojavi pijavica te je testirana Szilagyi-eva metoda prognoze pojave pijavica na 10 odabranih slučajeva pojave pijavica u razdoblju od 2013. do 2016. godine. Informacije o lokaciji, datumu i satu pojave pijavica dobivene su iz podataka prikupljenih s meteoroloških postaja, novinskih članaka, pomoću upitnika za javnost na internetskim stranicama DHMZ-a te zahvaljujući dojavama lokalnog stanovništva i zaljubljenika u ovu pojavu. Sedam pijavica pojavilo se u jutarnjim satima, a tri u poslijepodnevnim. Četiri slučaja pojave pijavica dogodila su se ljeti, dva u jesen i četiri zimi. Sinoptički tip vremena koji je prethodio pojavi pijavice određen je analizom karte geopotencijala na 500 hPa plohi. Četiri slučaja pojave pijavica dogodila su se u uvjetima jugozapadnog strujanja po visini (sinoptički tip SW), te su po dva slučaja zabilježena za vrijeme doline u obliku dugog vala na 500 hPa plohi (sinoptički tip LW), zatvorene visinske ciklone (sinoptički tip CLOSED) i doline u obliku kratkog vala na 500 hPa plohi (sinoptički tip SWT). Analizom podataka o atmosferskom električnom pražnjenju iz LINET sustava pijavice su klasificirane na one povezane s grmljavinskim nevremenom (7 slučajeva) i one "lijepog vremena" (3 slučaja).

S obzirom na sinoptički tip vremena, izdvojeno je pet slučajeva pojave pijavica koji su detaljno analizirani. Analiza je uključivala opise sinoptičkih i mezoskalnih uvjeta pomoću prizemnih sinoptičkih karata, karata geopotencijala na 500 hPa plohi, karata polja vjetra i relativne vrtložnosti na 300 hPa plohi, prizemnih mjerenja s meteoroloških postaja (SYNOP i METAR) i radiosondažnih mjerenja. Pijavice su nastale kada se nad područje Jadrana advektirao nestabilan i vlažan zrak, dakle prilikom premještanja frontalnih sustava uslijed čega je bilo prisutno značajno smicanje vjetra. Prilikom premještanja frontalnih sustava formirale su se i linije konvergencije u nižim slojevima atmosfere, a smicanje je kao posljedica položaja mlazne struje bilo prisutno i u višim slojevima.

Za analizu termodinamičkih i kinematičkih parametara te Szilagyi-evog indeksa za pijavice (SWI) korišten je mezoskalni numerički model WRF. Ovo je prva analiza pijavica na Jadranu koja uključuje model ovako velike prostorne (500 m) i vremenske razlučivosti. Za pet reprezentativnih slučajeva promatrana su modelirana polja vjetra na 10 m visine, polja refleksivnosti oblaka, CAPE-a i smicanja u slojevima od 0 - 1 km, od 0 - 3 km i od 0 - 6 km visine. Vremenska i prostorna usporedba modela za neke točke u domeni pokazala je prihvatljivu točnost simuliranja meteoroloških elemenata. Pogreške koje su se pritom javljale usporedive su s pogreškama koje su uočene i u drugim mezoskalnim simulacijama (npr. Poljak i sur., 2014; Telišman Prtenjak i sur., 2015). S obzirom na odabir parametrizacija u modelu, osobito odabirom lokalne MYJ sheme za granični sloj, model je često precjenjivao vlažnost najnižeg sloja atmosfere. Analiza modeliranih termodinamičkih parametara npr. CAPE-a je ukazivala na potencijal za razvoj konvekcije u svim slučajevima. Od pet reprezenta-

tivnih slučajeva četiri su povezana s grmljavinskim nevremenom pa se najčešće radilo o dubokoj konvekciji. Pored visokih vrijednosti CAPE-a, duboka konvekcija je u modelu prepoznata po visokim vrijednostima refleksivnosti oblaka. Na modelskom polju vjetra zabilježene su manje ili više izražene linije konvergencije, pa su u skladu s tim i vrijednosti smicanja u tri promatrana sloja raznolike.

Izvornim algoritmom su iz pseudo-sondaža za sve slučajeve pojave pijavica izračunate razlike visina kritičnih nivoa česti EL i LCL, razlike SST i temperature na visini 850 hPa plohe, iznos vjetra na visini 850 hPa plohe te vrijednosti *Szilagyi Waterspout Index-a* (SWI) za dvije najmanje domene C i D. SWI se ne preporuča računati ako je iznos brzine vjetra na visini 850 hPa plohe veći od 20 m/s jer se pijavica neće formirati. U široj okolini mjesta s kojeg je pijavica uočena iznos W_{850} nije prelazio graničnu vrijednost. Za sve slučajeve osim jednog, parovi vrijednosti $EL - LCL$ i $SST - T_{850}$ dali su pozitivne vrijednosti SWI indeksa u široj okolini mjesta s kojeg je pijavica uočena. Kod većine slučajeva je na cijeloj najmanjoj domeni postojala vjerojatnost pojave pijavica, a za izrazito nestabilne poput slučaja pojave pijavica 28.08.2013. godine kod Istre i Dubrovnika vrijednost SWI na cijelom je Jadranu vrlo visoka (od 5 do maksimalnih 10). Treba istaknuti da je samo za jedan slučaj $SWI \leq 0$ na cijeloj C i D domeni (Mali Lošinj 11.02.2016.). Za slučajeve kod kojih je pijavica nastala za vrijeme premještanja frontalnog sustava preko Jadrana polje SWI prati pomicanje hladne fronte, pa su tako vrijednosti iza fronte manje ili jednake nuli, a ispred fronte pozitivne. Ipak treba naglasiti da je ispitivanje SWI indeksa za slučajeve pijavica u hladnom dijelu godine relativno rijetko, a osobito onih zimskih. Keul i sur. (2009) pokušali su ispitati sezonsku osjetljivost SWI, međutim, zbog ograničenog seta analiziranih pijavica to nije bilo moguće. Renko i sur. (2012) dobili su u 71 % analiziranih slučajeva u hladnom dijelu godine povoljne uvjete za razvoj pijavice prema SWN. Međutim u dva slučaja od promatranih sedam, SWN kao prognostička metoda, nije ukazala na pojavu pijavice. Time je ostalo otvoreno pitanje prilagodbe SWI granica kao prediktora pojave pijavica nad Jadranom (osobito zimi van intervala 0-10), čime rezultati ove studije upotpunjuju znanje o ovoj problematici.

Za proračun SHARPPy programom izdvojeno je dvadeset pseudo-sondaža iz najmanje domene nad morskom površinom u neposrednoj blizini mjesta gdje su pijavice uočene. Osim parametara potrebnih za izračun SWI, SHARPPy računa termodinamičke indekse: CAPE, CAPE od 0 do 3 km, CIN, TT i KI, te kinematički parametar smicanja u sloju od 0 do 1 km i od 0 do 6 km visine. Vrijednosti CAPE-a su uglavnom veće u toplom dijelu godine. Izuzetak su slučajevi pojave pijavica kod Murtera (13.01.2016.) i Novigrada (30.06.2014.), gdje zimski slučaj ima skoro dvostruko veće vrijednosti CAPE-a nego ljetni. Slična je situacija s vrijednostima CAPE-a u prva 3 km. CIN je u većini slučajeva oko nule, osim za dva zimska slučaja pojave pijavica kod Komiže 14.01.2016. godine (oko -300 J/kg) i Malog Lošinja 11.02.2016. godine (oko -200 J/kg). Vrijednosti KI su u glavnini slučajeva između 20 i 40, dakle postoji vjerojatnost za pojavu grmljavinskih oluja. Izuzetak je zimski slučaj pojave pijavice

kod Komiže za koji je KI negativan. Za zimske slučajeve vrijednost TT indeksa je nešto veća nego za ostale s ponovno istim izuzetkom slučaja kod Komiže. Za gotovo sve pijavice su termodinamički parametri nestabilnosti sugerirali na nestabilnu okolinu u kojoj je moguća pojava konvekcije, no ipak termodinamički indeksi nestabilnosti nisu dovoljni za prognozu pojave pijavica. Razlika $EL - LCL$ nalazi se u rasponu između 7 i 11 km, odstupaju slučajevi kod Komiže i Malog Lošinja s razlikom $EL - LCL$ od približno 2.5 km. Razlike $SST - T_{850}$ su nešto veće kod zimskih slučajeva, s izuzetkom pijavice kod Splita 06.01.2016. godine gdje je ta razlika manja od 10 °C. Gotovo sve dobivene vrijednosti SWI su povoljne, odnosno veće ili jednake nuli. Za ljetnje i jesenje slučajeve SWI daje veću vjerojatnost pojave pijavica nego za zimske slučajeve. Na svim slučajevima je primjećeno da razlika $EL - LCL$ ima nešto veću težinu pri određivanju iznosa SWI nego razlika $SST - T_{850}$. Iznosi smicanja u sloju od 0 - 1 km visine veći su za zimske slučajeve gdje se ističe Mali Lošinj (oko 16 m/s). Komiža, zimski slučaj pojave pijavice s najmanjim pozitivnim vrijednostima SWI u odnosu na ostale slučajeve, u sloju od 0 - 6 km visine ima vrijednosti smicanja oko 33 m/s. Novigrad, ljetni slučaj pojave pijavice koji ima manje vrijednosti CAPE-a nego neki zimski slučajevi, a u usporedbi s ostalim ljetnim slučajevima ima veće vertikalno smicanje u oba promatrana sloja.

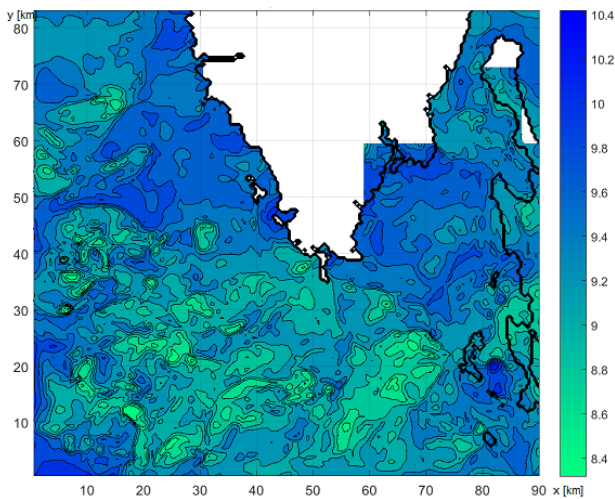
Općenito se može zaključiti da slučajevi pojave pijavica s izraženom konvektivnom aktivnošću imaju manje vrijednosti vertikalnog smicanja i uglavnom su to ljetni slučajevi, dok je situacija za zimske slučajeve obrnuta. Također, SWI daje manju vjerojatnost pojave zimskih slučajeva. Szilagyi-ev nomogram i indeks za pijavice ima važnu ulogu u poboljšanju njihove prognoze, no za formiranje pijavica nužni su povoljni termodinamički i dinamički uvjeti, odnosno prisustvo konvekcije i smicanja, a SWI uzima u obzir samo termodinamičke procese. Iako je SWI dao vjerojatnost za pojavu gotovo svih odabranih slučajeva, potrebno je metodu poboljšati uvođenjem smicanja te bi se tad najvjerojatnije bolje istaknula područja gdje je pojava pijavica veća. U budućim istraživanjima metodu prognoze pijavica pomoću Szilagyi-evog nomograma i indeksa trebalo bi testirati na još većem broju slučajeva te napraviti prilagodbu za uvjete na Jadranu. Konačan cilj bio bi koristiti prognostički indeks operativno te po potrebi izdavati prognoze ili upozorenja o mogućoj pojavi pijavica.

Dodaci

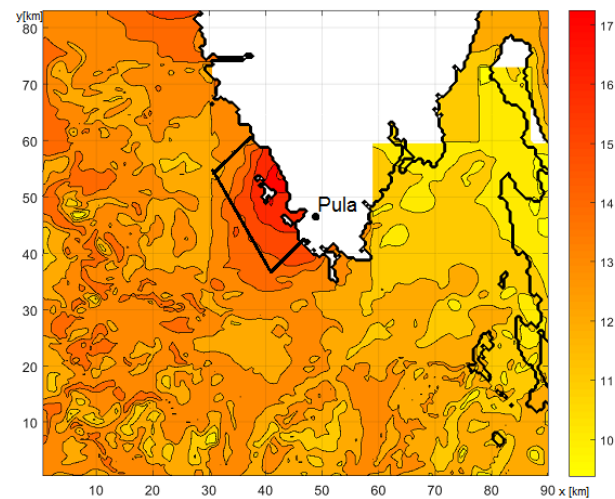
Dodatak A Vrijednosti $EL-LCL$, $SST-T_{850}$ za D domenu te SWI za C i D domenu

Slike prikazuju razliku visine kritičnih nivoa česti LCL i EL, razliku SST i temperature na visini 850 hPa plohe te vrijednosti Szilagyi Waterspout Index-a i to 1 h prije pojave pijavice na dvije najmanje domene: C s horizontalnom rezolucijom 1.5 km i D s horizontalnom rezolucijom 0.5 km. Svaka navedena veličina prikazana je zasebno za sve slučajeve pojave pijavica koji nisu detaljno analizirani u poglavlju Rezultati i diskusija.

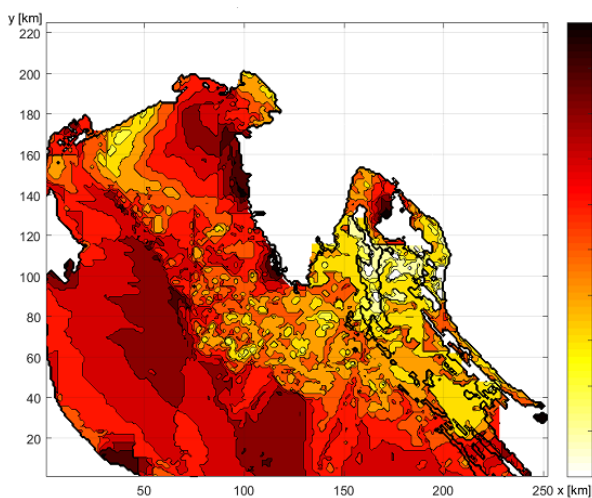
Sinoptički tip SW: Pula (28.08.2013.)



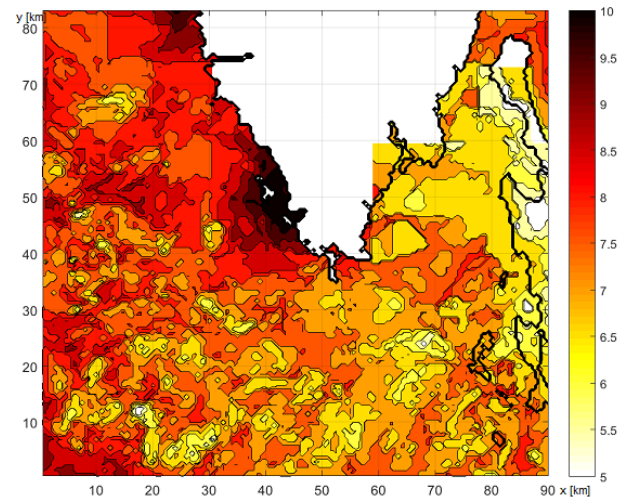
(a) $EL-LCL$ (km), domena D



(b) $SST-T_{850}$ (°C), domena D



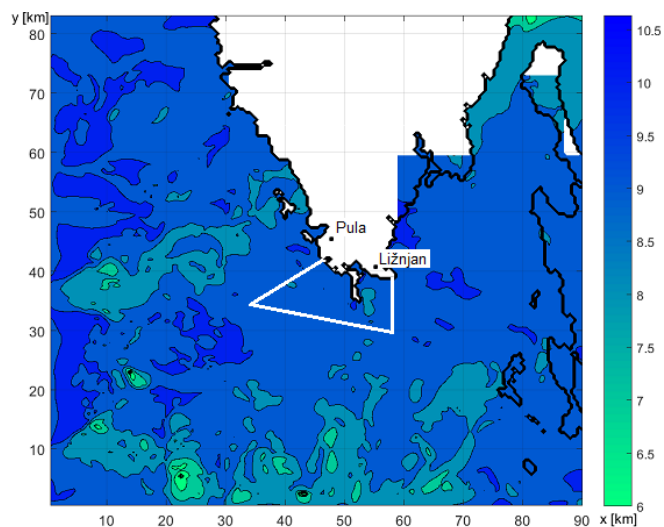
(c) SWI, domena C



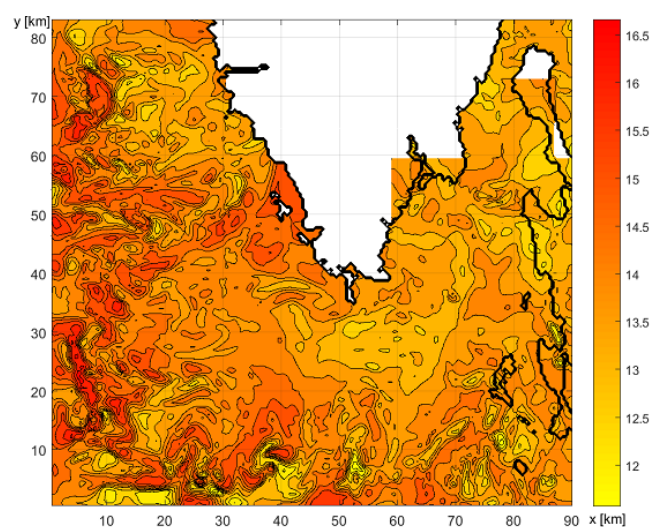
(d) SWI, domena D

Slika A.1. Razlike visina EL i LCL, razlike SST i temperature na 850 hPa plohi za domenu D, te vrijednosti SWI za domenu C i D u 07 UTC 28.08.2013. godine.

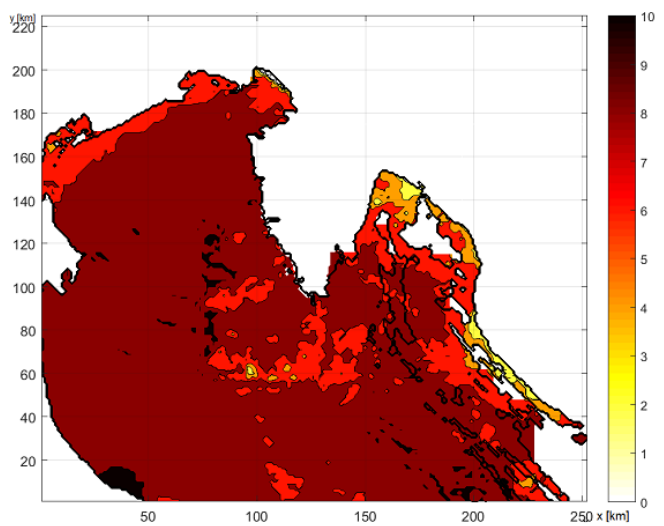
Sinoptički tip SW: Ližnjan (15.08.2014.)



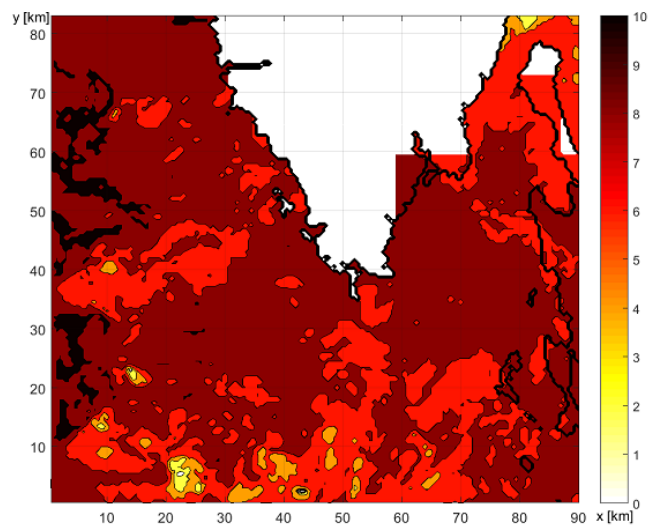
(a) EL-LCL (km), domena D



(b) SST- T_{850} (°C), domena D



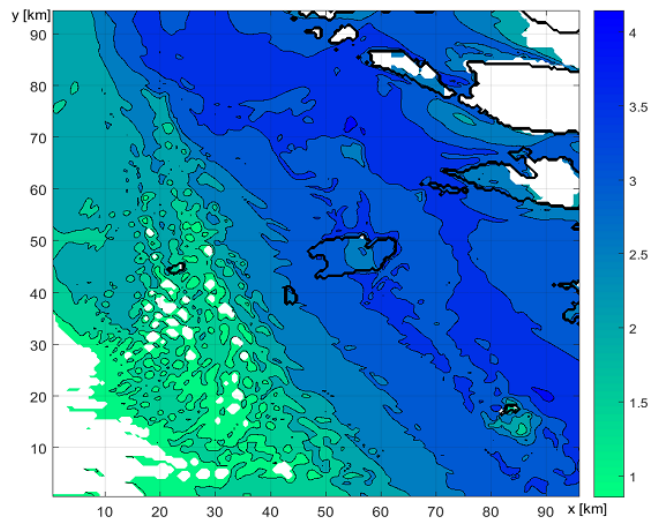
(c) SWI, domena C



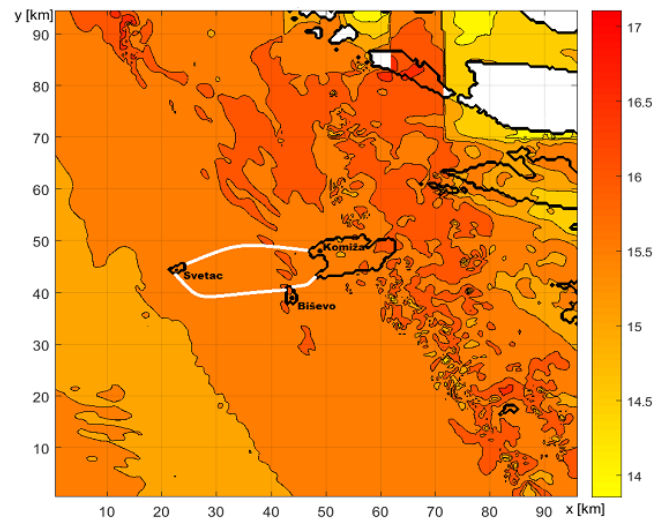
(d) SWI, domena D

Slika A.2. Razlike visina EL i LCL, razlike SST i temperature na 850 hPa plohi za domenu D, te vrijednosti SWI za domenu C i D u 09:15 UTC 15.08.2014. godine.

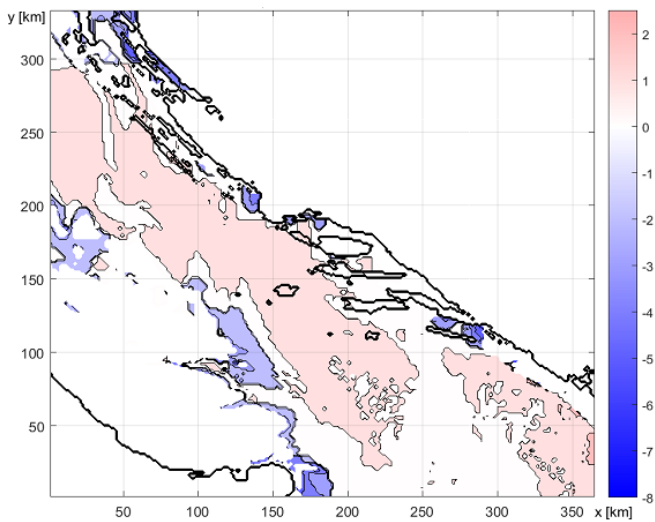
Sinoptički tip LW: Komiža (14.01.2016.)



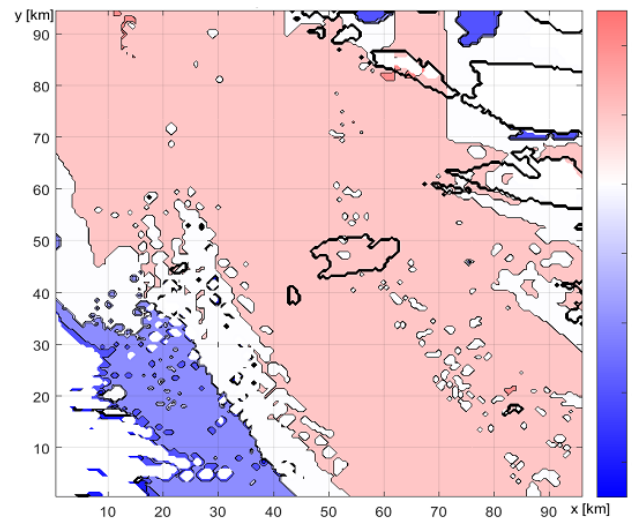
(a) EL-LCL (km), domena D



(b) SST- T_{850} (°C), domena D



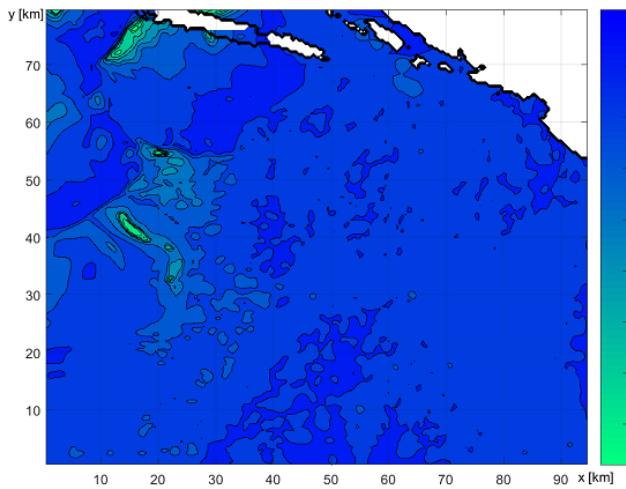
(c) SWI, domena C



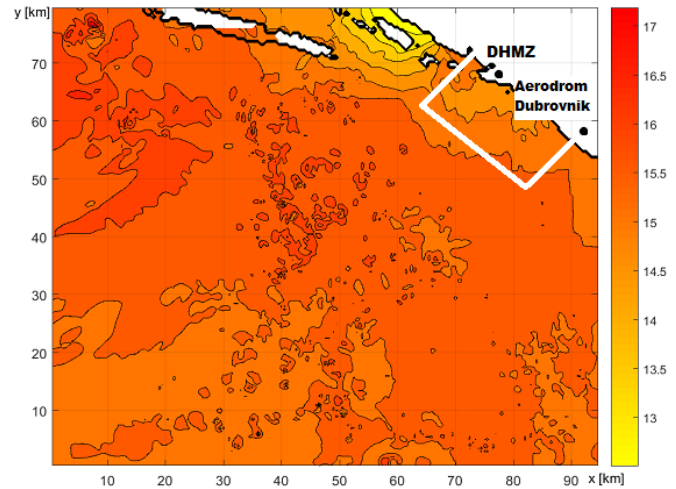
(d) SWI, domena D

Slika A.3. Razlike visina EL i LCL, razlike SST i temperature na 850 hPa plohi za domenu D, te vrijednosti SWI za domenu C i D u 08:15 UTC 14.01.2016. godine.

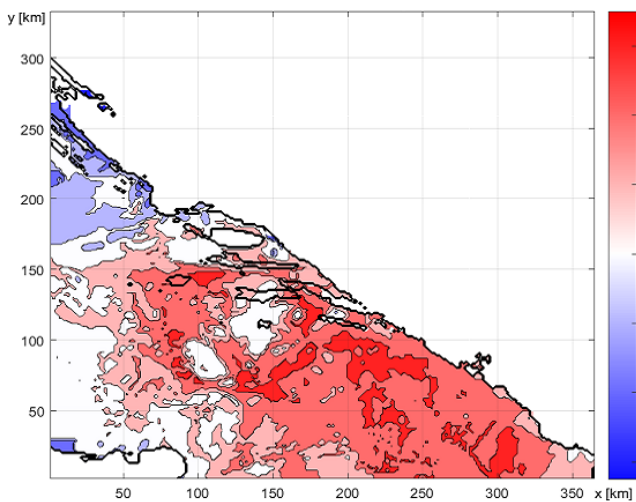
Sinoptički tip CLOSED: Dubrovnik (25.09.2015.)



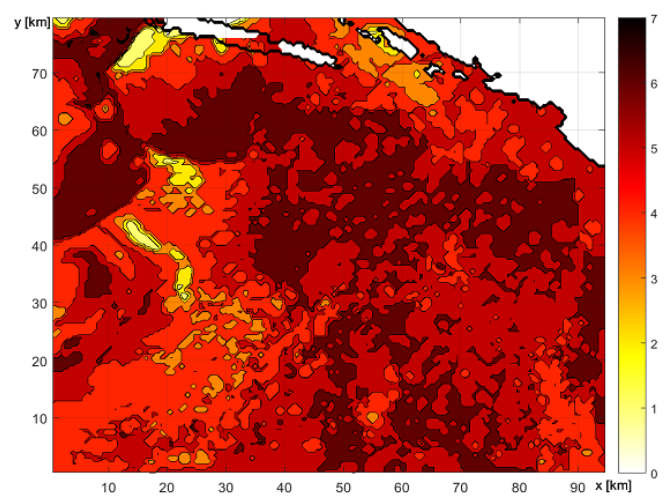
(a) EL-LCL (km), domena D



(b) SST- T_{850} (°C), domena D



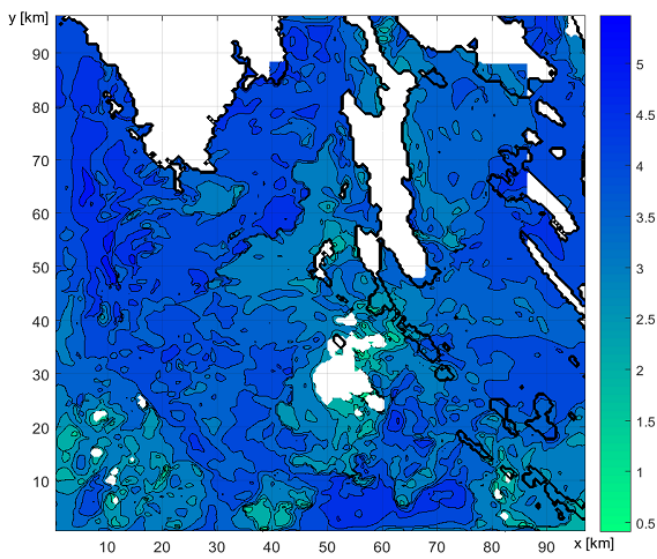
(c) SWI, domena C



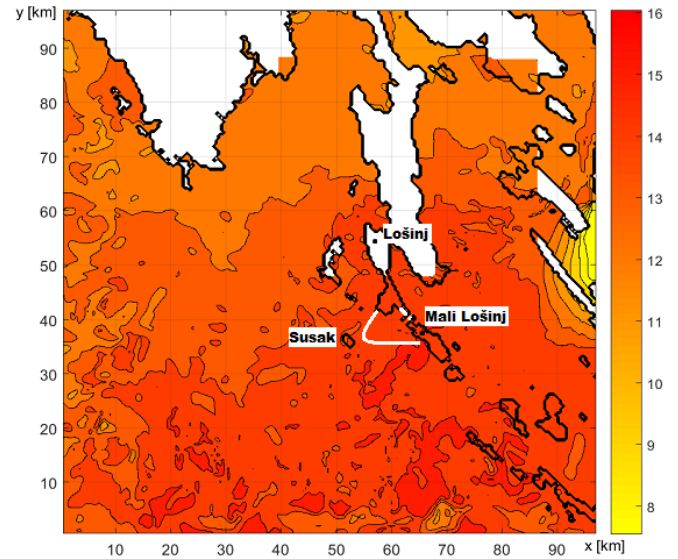
(d) SWI, domena D

Slika A.4. Razlike visina EL i LCL, razlike SST i temperature na 850 hPa plohi za domenu D, te vrijednosti SWI za domenu C i D u 11:30 UTC 25.09.2015. godine.

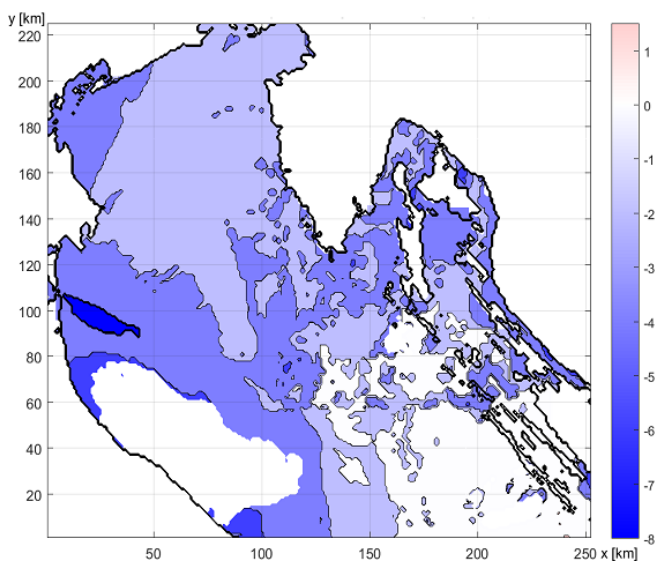
Sinoptički tip SWT: Mali Lošinj (11.02.2016.)



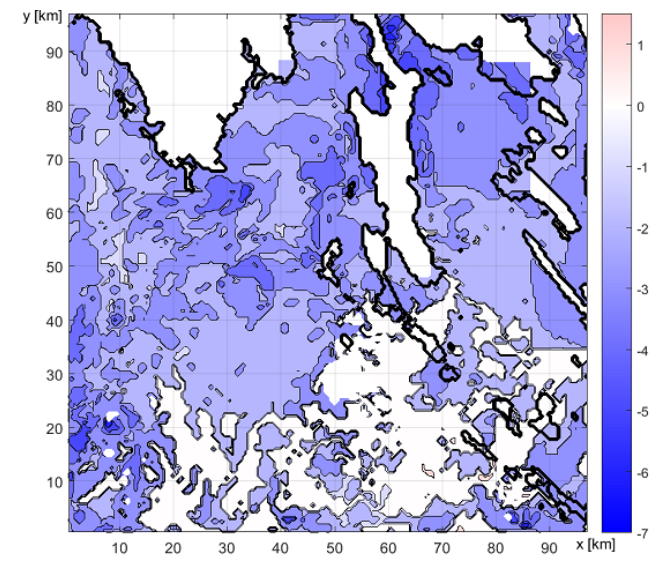
(a) EL-LCL (km), domena D



(b) SST- T_{850} (°C), domena D



(c) SWI, domena C

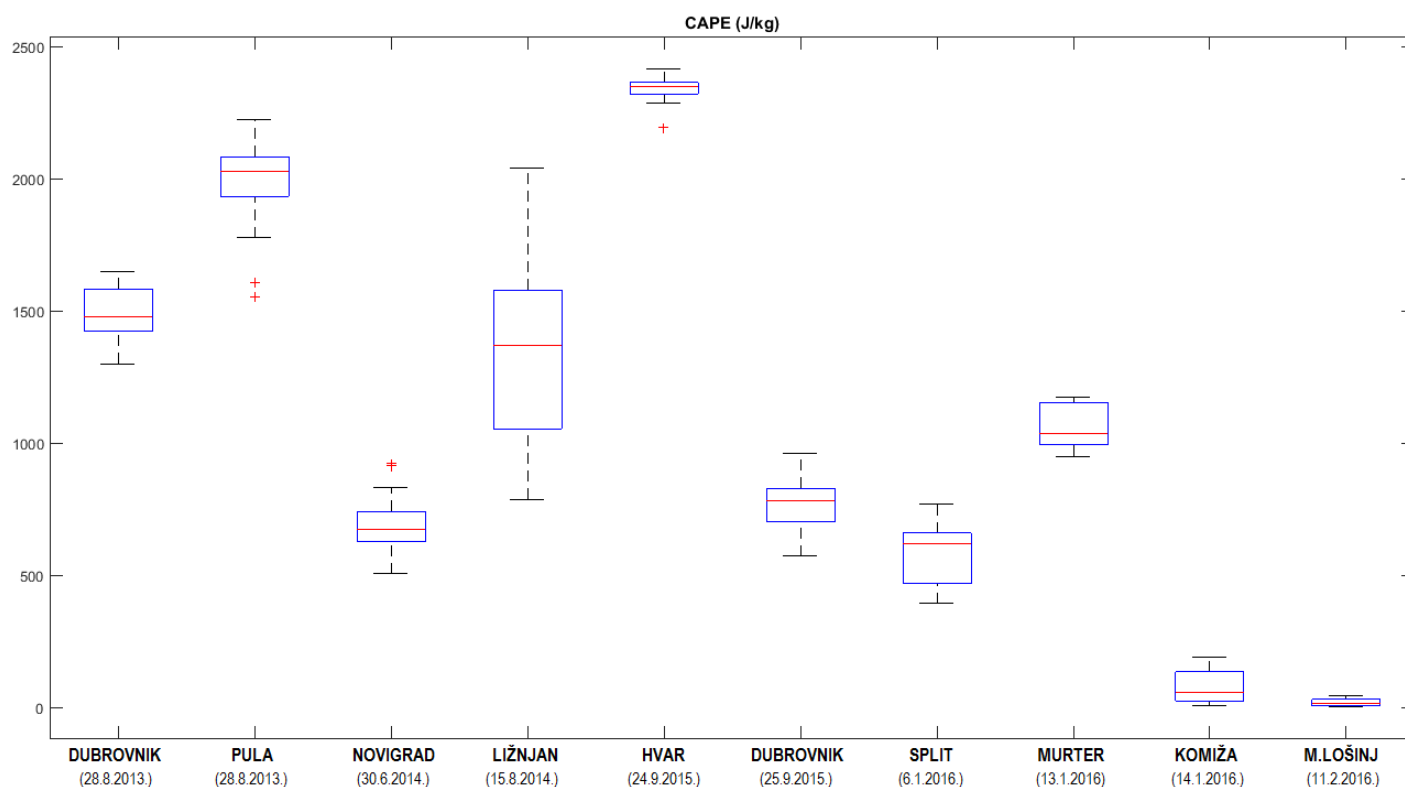


(d) SWI, domena D

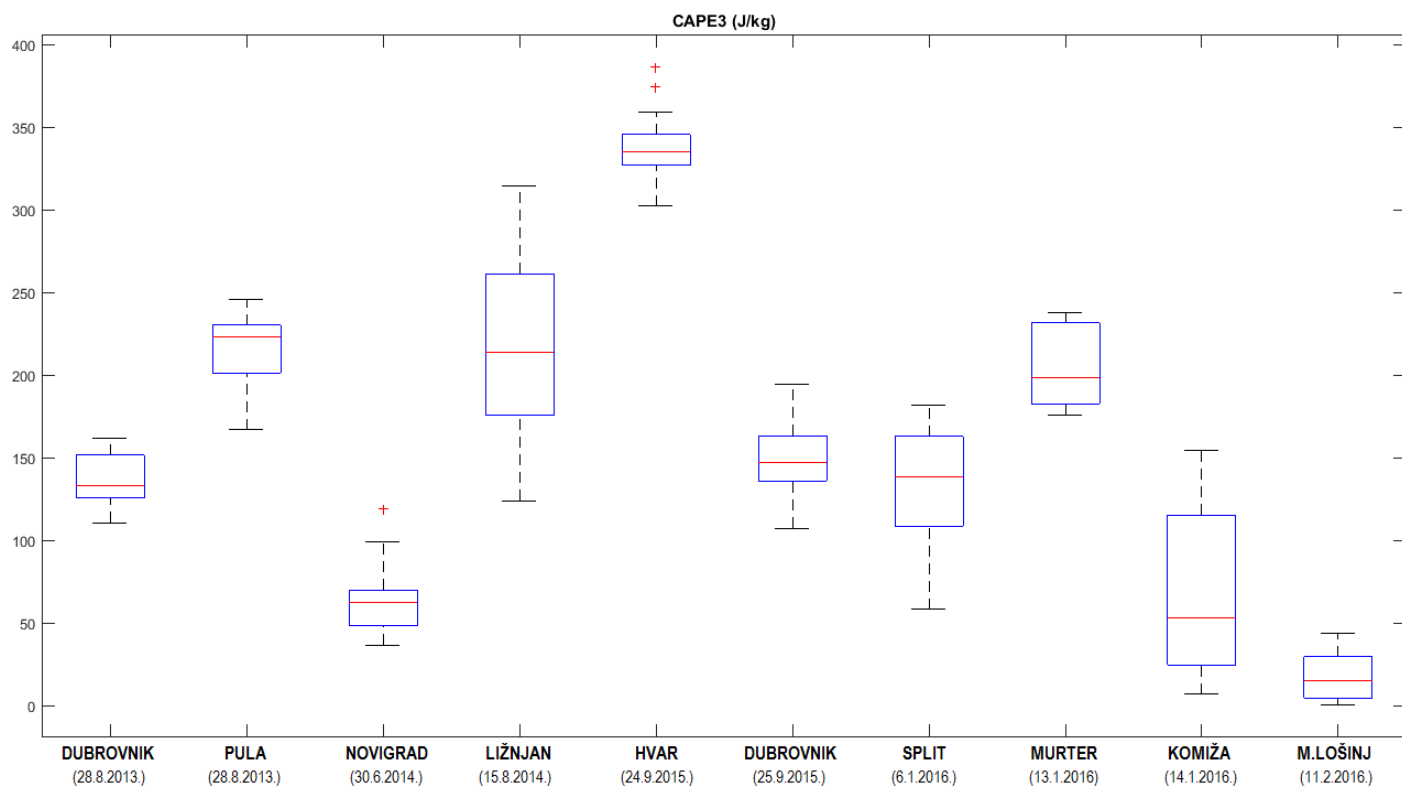
Slika A.5. Razlike visina EL i LCL, razlike SST i temperature na 850 hPa plohi za domenu D, te vrijednosti SWI za domenu C i D u 12 UTC 11.02.2016. godine.

Dodatak B Rezultati SHARPy programa za sve slučajeve pojave pijavica

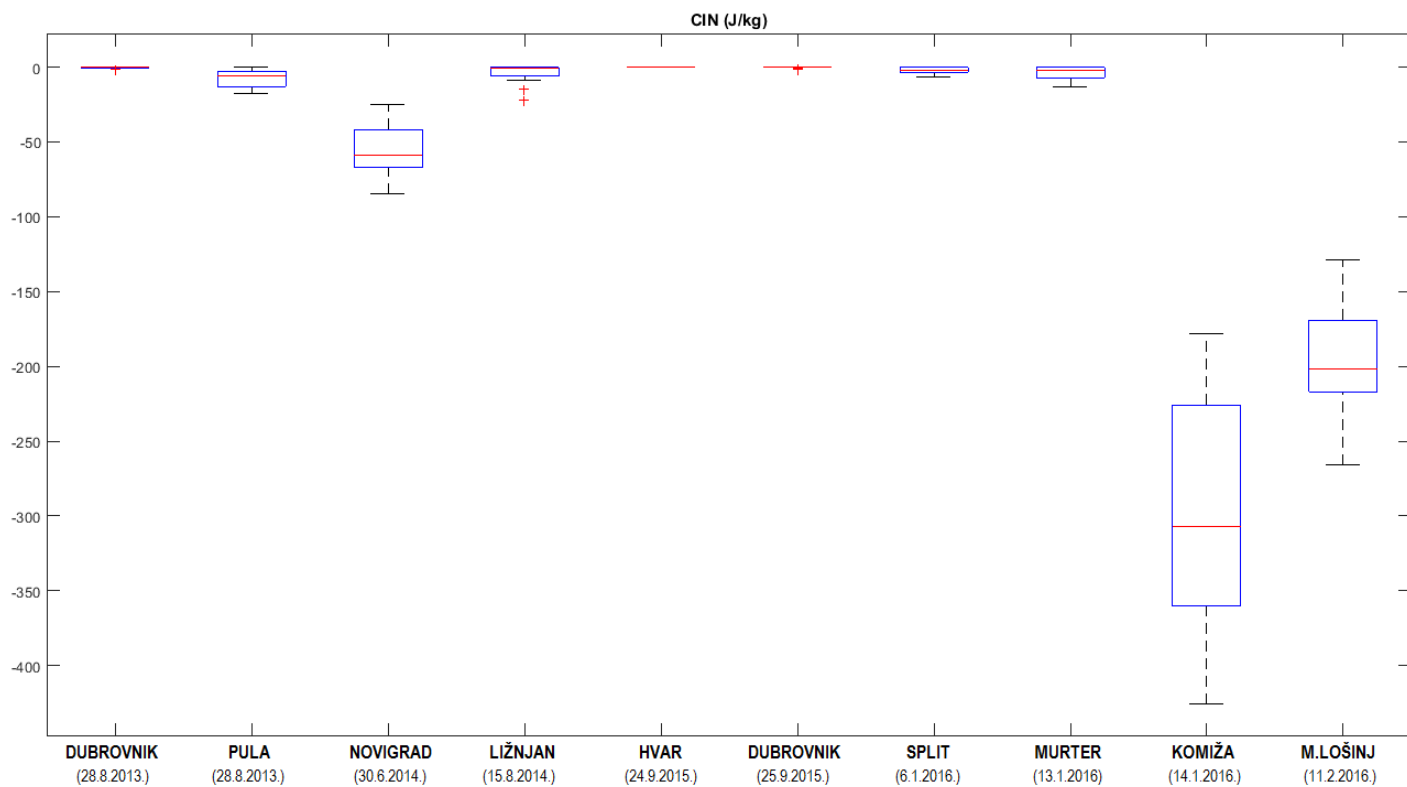
Slike prikazuju dijagrame s pravokutnikom za termodinamičke indekse nestabilnosti (CAPE, CAPE3, CIN, TT i KI), kinematičke parametre (smicanje u sloju od 0 - 1 km i od 0 - 6 km visine), razliku visine kritičnih nivoa česti LCL i EL, razliku SST i temperature na visini 850 hPa plohe, vjetar na visini 850 hPa plohe, sve to dobiveno SHARPy programom, te vrijednosti SWI. Svaka navedena veličina dobivena je za 20 točaka na morskoj površini u neposrednoj blizini mjesta s kojeg je pijavica opažena i prikazana je zasebno za sve slučajeve pojave pijavica 1 h prije pojave pijavice.



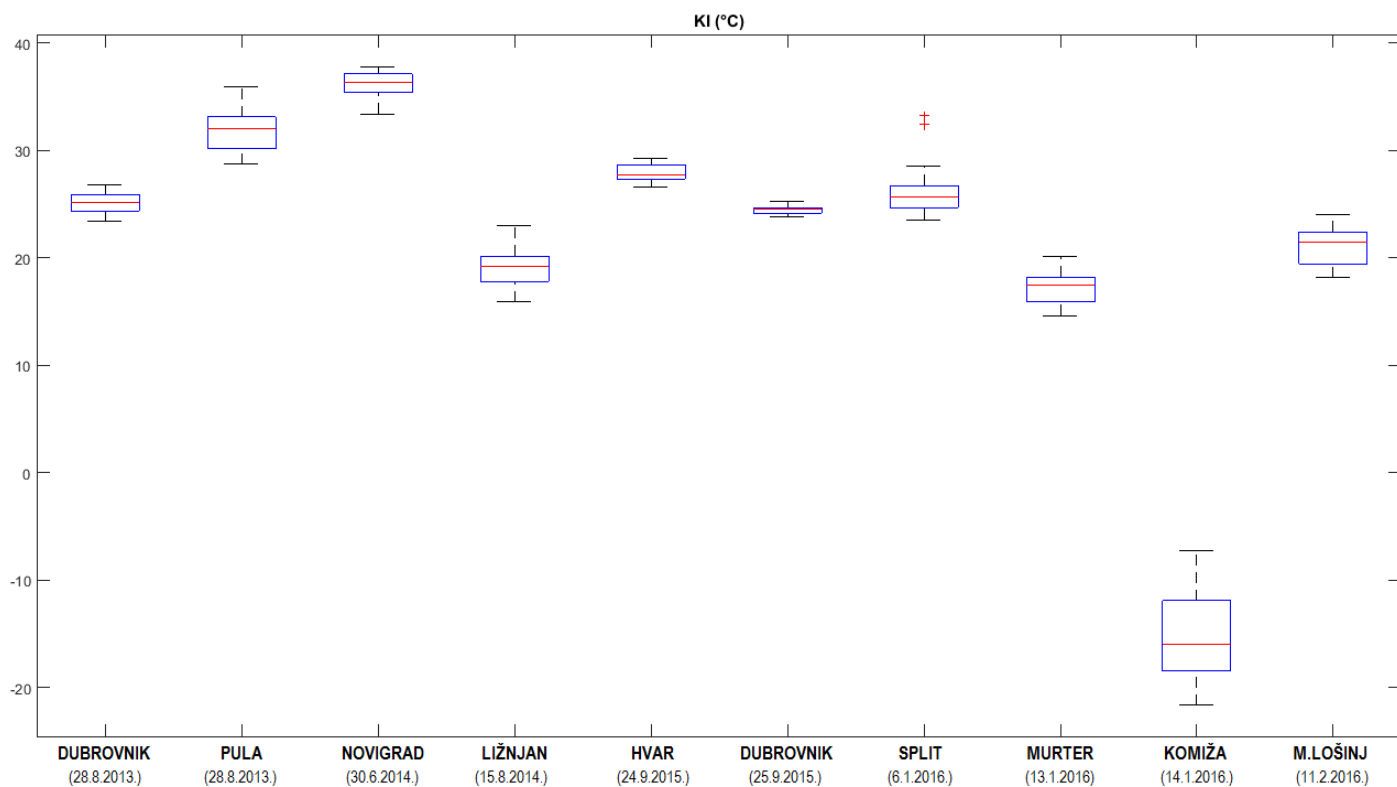
Slika B.1. Prikaz parametra CAPE za sve slučajeve pojave pijavica. Opis prikaza isti je kao na slici 3.3.



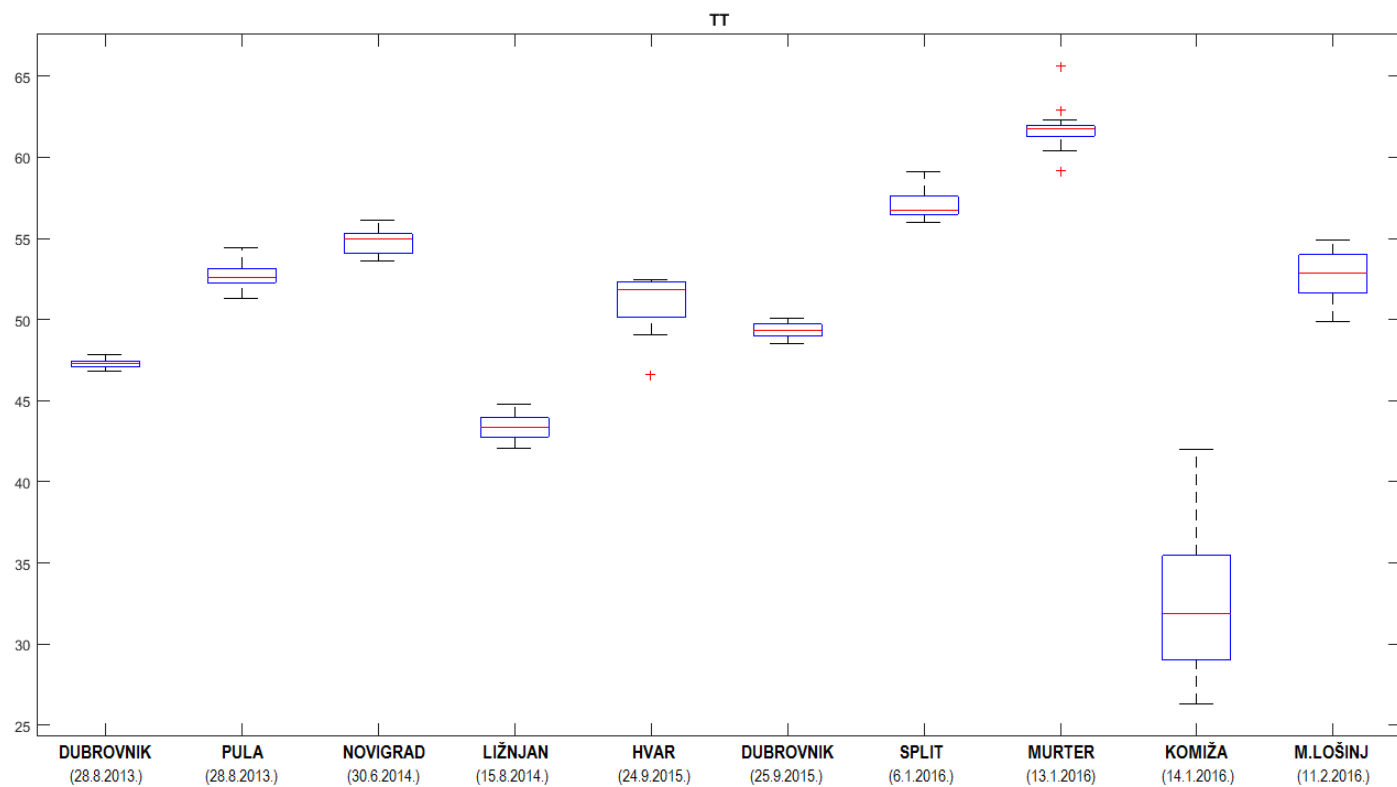
Slika B.2. Prikaz parametra CAPE3 za sve slučajeve pojave pijavica. Opis prikaza isti je kao na slici 3.3.



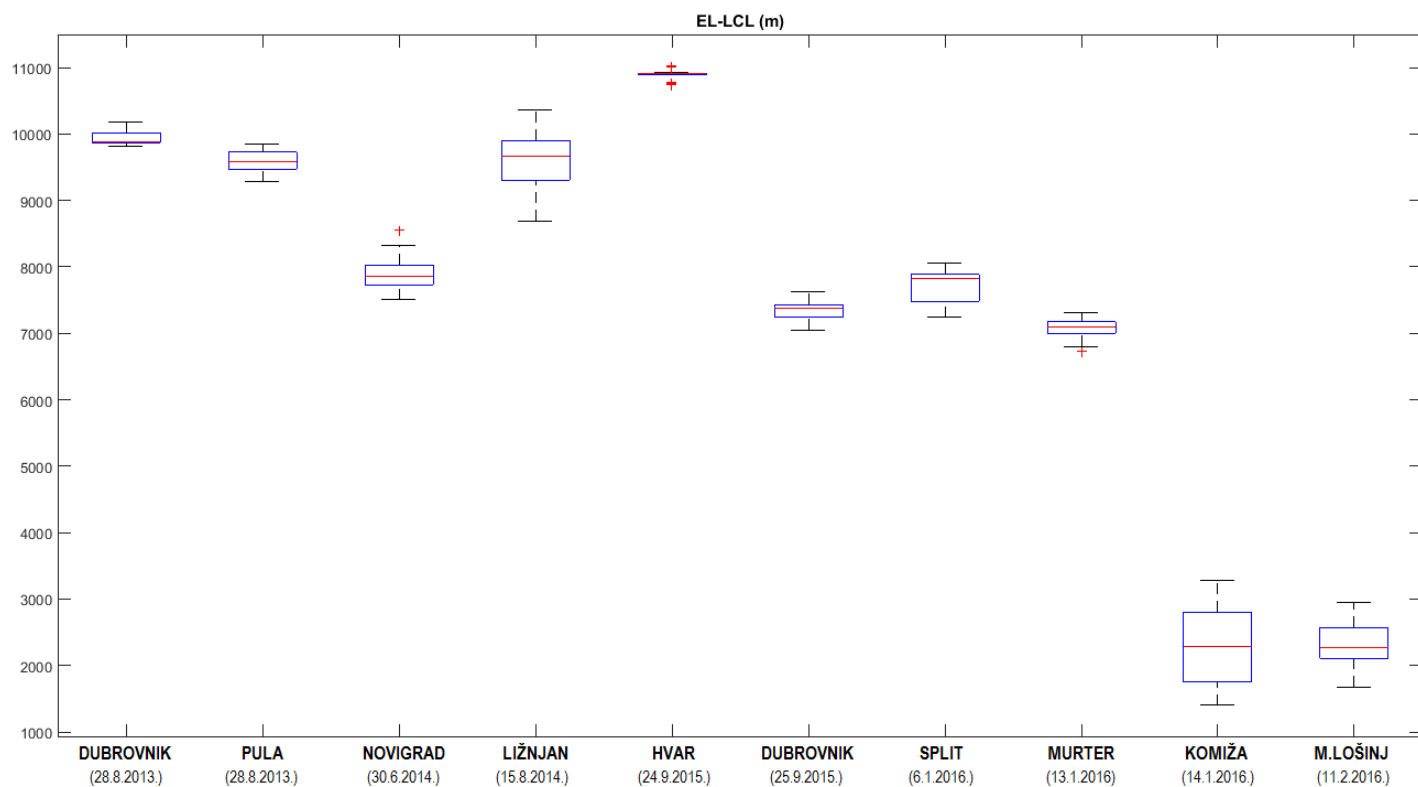
Slika B.3. Prikaz parametra CIN za sve slučajeve pojave pijavica. Opis prikaza isti je kao na slici 3.3.



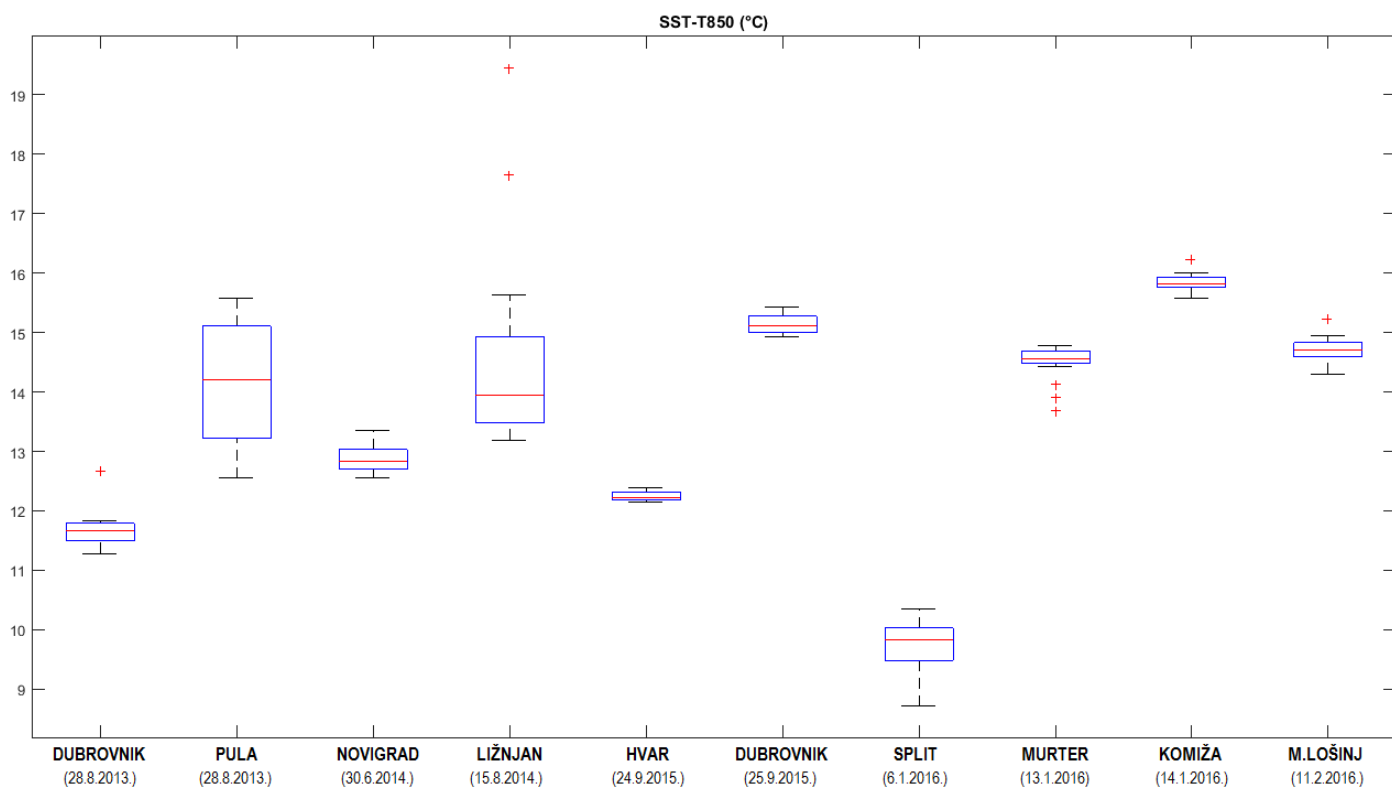
Slika B.4. Prikaz parametra KI za sve slučajeve pojave pijavica. Opis prikaza isti je kao na slici 3.3.



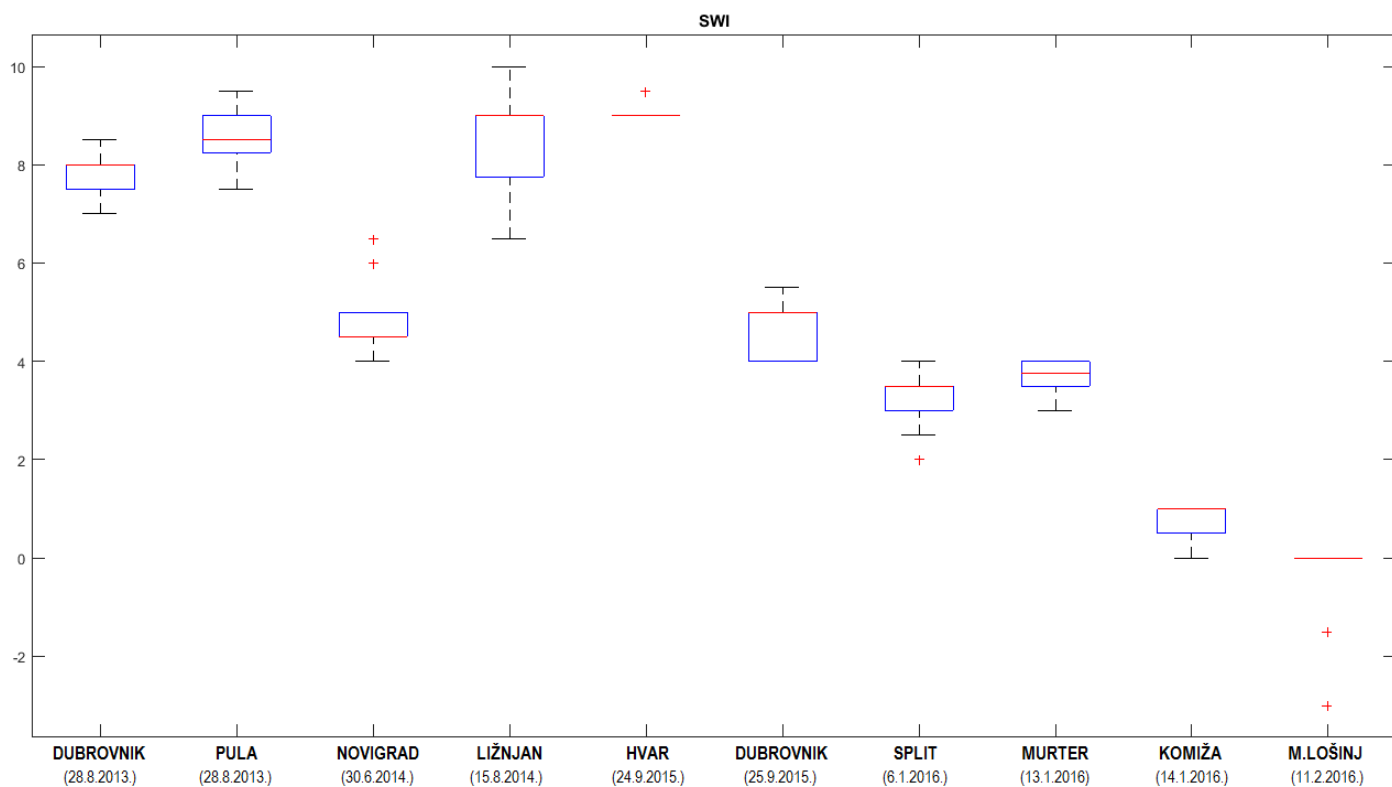
Slika B.5. Prikaz parametra TT za sve slučajeve pojave pijavica. Opis prikaza isti je kao na slici 3.3.



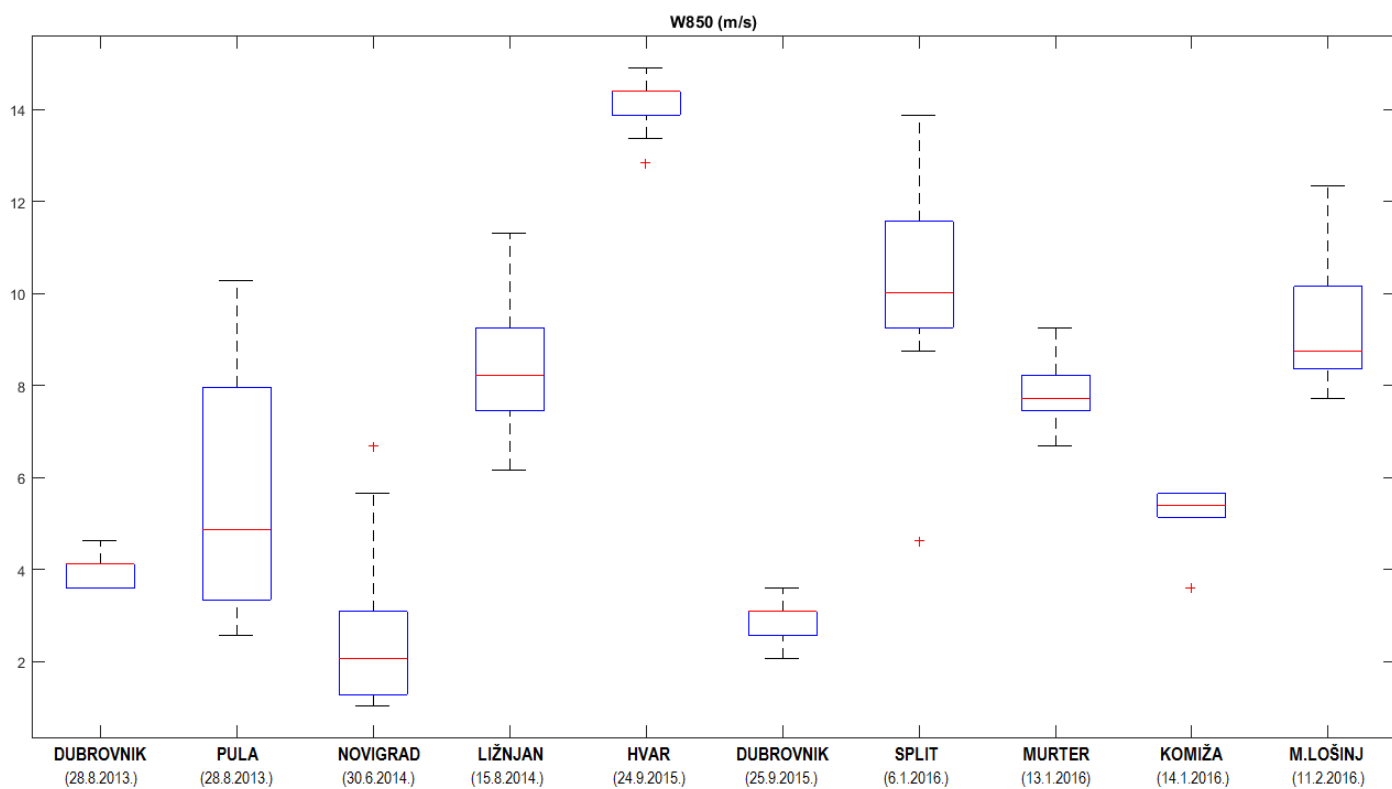
Slika B.6. Prikaz parametra $EL-LCL$ za sve slučajeve pojave pijavica. Opis prikaza isti je kao na slici 3.3.



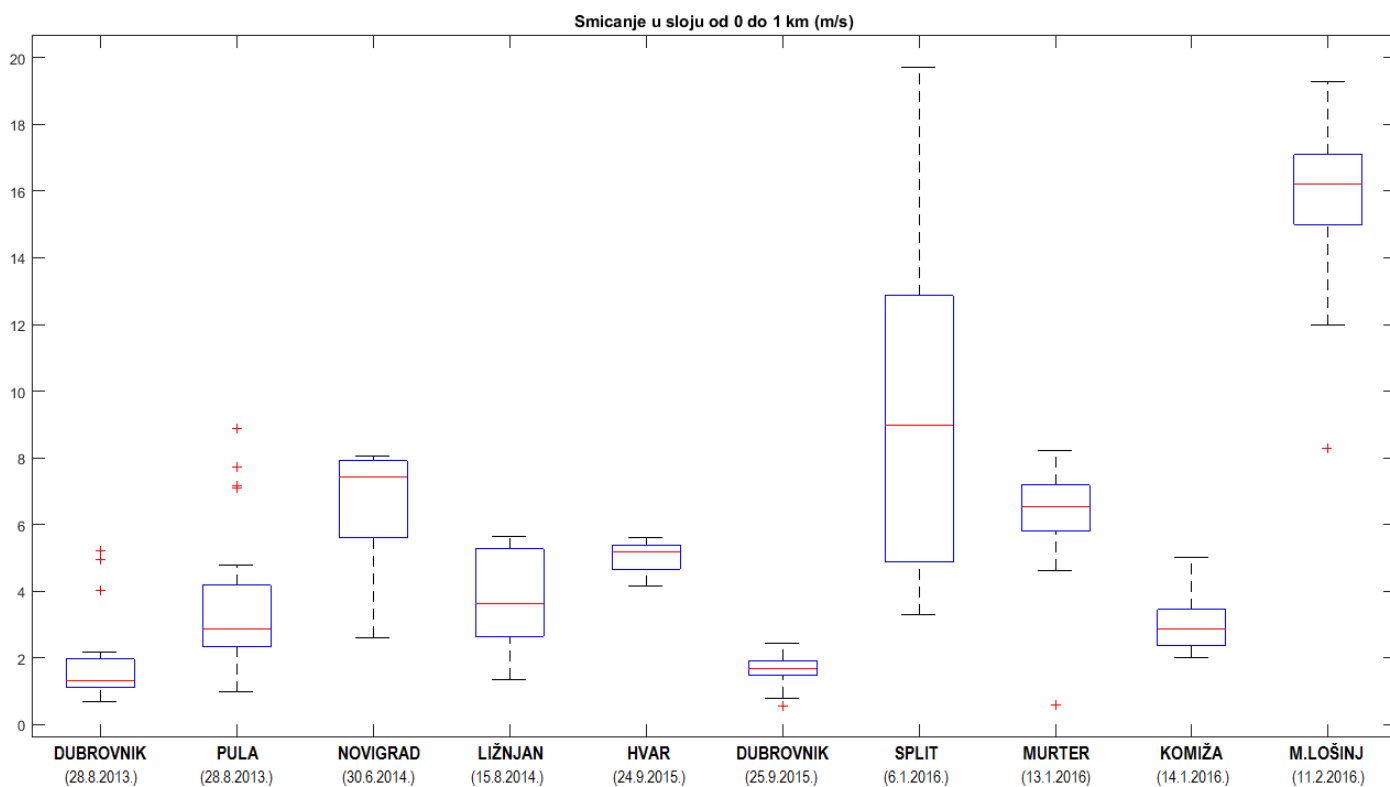
Slika B.7. Prikaz parametra $SST-T_{850}$ za sve slučajeve pojave pijavica. Opis prikaza isti je kao na slici 3.3.



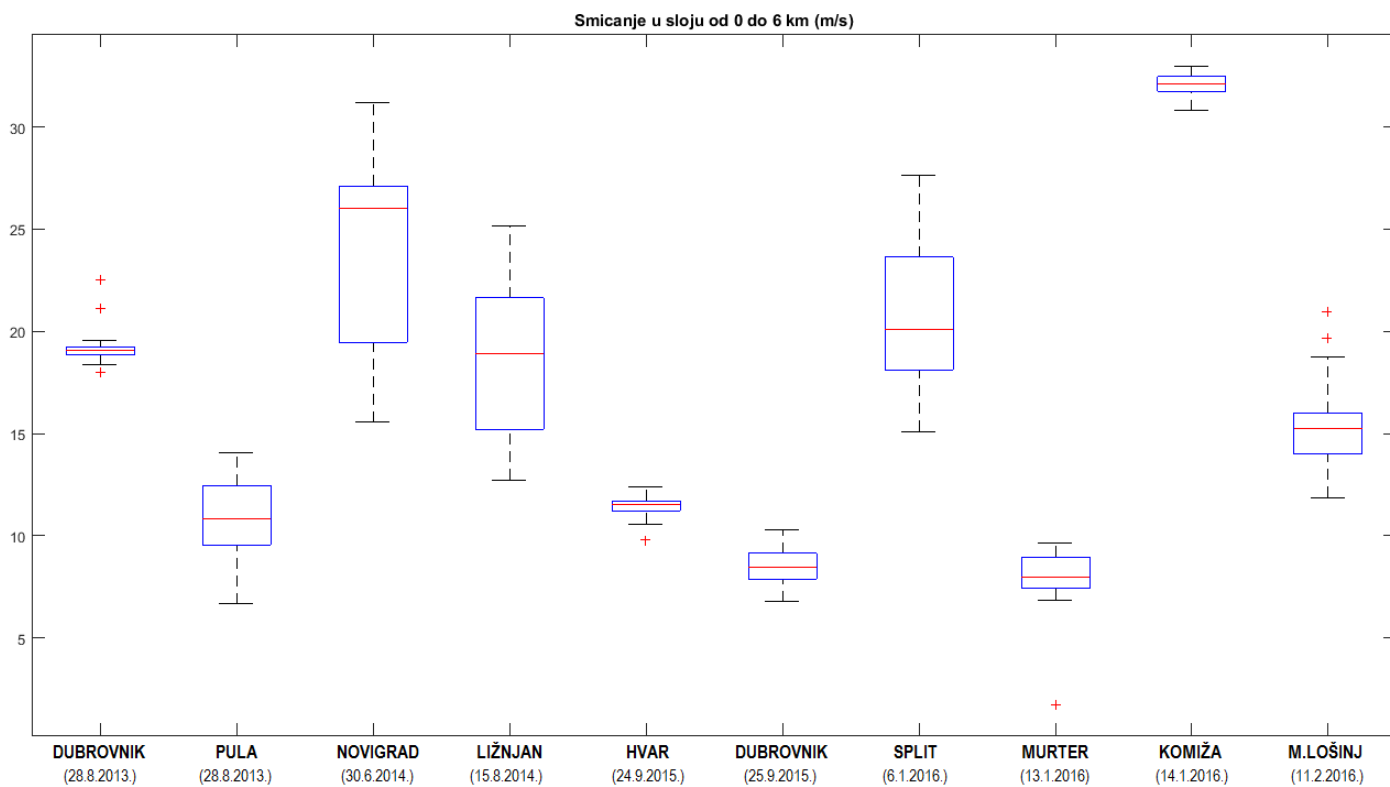
Slika B.8. Prikaz parametra SWI za sve slučajeve pojave pijavica. Opis prikaza isti je kao na slici 3.3.



Slika B.9. Prikaz parametra W_{850} za sve slučajeve pojave pijavica. Opis prikaza isti je kao na slici 3.3.



Slika B.10. Prikaz parametra smicanja u sloju od 0 do 1 km za sve slučajeve pojave pijavica.
Opis prikaza isti je kao na slici 3.3.



Slika B.11. Prikaz parametra smicanja u sloju od 0 do 6 km za sve slučajeve pojave pijavica.
Opis prikaza isti je kao na slici 3.3.

Literatura

- [1] Bach, I., 1987. Trinaest morskih pijavica pred Dubrovnikom, *Priroda*. 1987/88, 76, 254-257.
- [2] Belušić, D., Hrastinski, M., Večenaj, Ž., Grisogono, B., 2013. Wind regimes associated with a mountain gap at the northeastern Adriatic coast. *J. Appl. Meteor. Climat.* 52, 2089-2105.
- [3] Betz, H.D., Schmidt, K., Laroche, P., Blanchet, P., Oettinger, W.P., Defer, E., Dzievit, Z., Konarski, J., 2009. LINET – An international lightning detection network in Europe. *Atmos. Res.* 91, 564-573.
- [4] Bošković, R., 1749. Sopra il turbine che la notte tra gli XI, e XII Giugno del MDCCXLIX daneggiò una gran parte di Roma dissertazione, Rome.
- [5] Davies-Jones, R., Trapp, R.J., Bluestein, H.B., 2001. Tornadoes and tornadic storms in severe convective storms. *Meteorological Monographs*, AMS, 28, 50, 167-221.
- [6] Doswell, C.A., 2001. What is a Tornado? (<http://www.cimms.ou.edu/~doswell>)
- [7] Dudhia, J., 1989. Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, 46, 3077–3107.
- [8] Giaiotti, D.B., Giovannoni, M., Pucillo, A., Stel, F., et al., 2007. The Climatology of tornadoes and waterspouts in Italy. *Atmos. Res.* 83, 534–541.
- [9] Golden, J.H., 1974a. The life cycle of Florida Keys waterspouts I. *J. Appl. Meteor.* 13, 676–692.
- [10] Golden, J.H., 1974b. Scale-interaction implications for waterspout life cycle II. *J. Appl. Meteorol.* 13, 676–692.
- [11] Grotjahn, R., 2000. Multiple waterspouts at Lake Tahoe. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 81, 695–702.
- [12] Holton, J.R., 2004. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Academic Press, 4. izdanje, San Diego, USA, 535 str.
- [13] Ivančan Picek, B., Jurčec, V., 2005. Pijavice na Jadranu, njihova pojava u razdoblju 2000-2003. godine. *Jadranska Meteorologija*. 28-34.
- [14] Janjić, Z., 1994. The Step–Mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Mon. Wea. Rev.* 122, 927–945.

- [15] Keul A.G., Sioutas, M.V. and Szilagyi W., 2009. Prognosis of Central – Eastern Mediterranean waterspouts, *Atmos. Res.* 93, 426-436.
- [16] Kuiper, J., van der Haven, M., 2007. The KHS Index, a new index to calculate risk of (water)spout development. 4th European Storm Conference on Severe Storms.
- [17] Kuzmić, J., 2012. Prostorno-vremenska raspodjela pijavica na Jadranu. Diplomski rad. Geofizički odsjek PMF-a, 53 str.
- [18] Kuzmić, M., Grisogono, B., Li, X.M., Lehner, S., 2015. Examining a deep and a shallow Adriatic bora event. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 141, 3434-3438.
- [19] Marsh, P.T. and J.A. Hart, 2012. SHARPPY: A Python Implementation of the Skew-T/Hodograph Analysis and Research Program, 2nd Symposium on Advances in Modeling and Analysis Using Python. New Orleans, LA, Amer. Meteor. Soc.
- [20] Mlawer, Eli. J., Steven. J. Taubman, Patrick. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.* 102, 16663–16682.
- [21] Morrison, H., G. Thompson, V. Tatarskii, 2009. Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one- and two-moment schemes. *Mon. Wea. Rev.* 137, 991–1007.
- [22] North, G.R., Pyle, J., Zhang, F., 2015. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. Academic Press, 2. izdanje, San Diego, USA, 2874 str.
- [23] Poljak, G., Telišman Prtenjak, M., Kvakić, M., Strelec Mahović, N., Babić, K., 2014. Wind patterns associated with the development of daytime thunderstorms over Istria. *Ann. Geophys.* 32, 401-420.
- [24] Renko, T., Kozarić, T., Tudor, M., 2011. Testing waterspout forecasting indices over the Adriatic Sea using the ALADIN model. Poster, 6th ECSS, Palma de Mallorca, Balearic Islands, 3-7 October.
- [25] Renko, T., Kozarić, T., Tudor, M., 2012. An assessment of waterspout occurrence in the Eastern Adriatic basin in 2010: Synoptic and mesoscale environment and forecasting method. *Atmos. Res.*, doi:10.1016/j.atmosres.2012.06.018.
- [26] Renko, T., Kuzmić, J., Šoljan, V., Strelec-Mahović, N., 2016. Waterspouts in the Eastern Adriatic from 2001 to 2013. *Nat. Hazards.*, doi:10.1007/s11069-016-2192-5.

- [27] Renno, N.O., Bluestein, H.B., 2001. A simple theory for waterspouts. *J. Atmos. Sci.* 58, 927-932.
- [28] Renno, N. O., and A. P. Ingersoll, 1996. Natural convection as a heat engine: A theory for CAPE. *J. Atmos. Sci.* 53, 572–585.
- [29] Poje, D., 2004. Pijavice, trombe i tornada - Prilog istraživanju tih pojava u Hrvatskoj. *Jadranska Meteorologija.* 44, 22-31.
- [30] Schwiesow, R. L., 1981. Horizontal wind structures in waterspouts. *J. Appl. Meteor.* 20, 349-360.
- [31] Sioutas, M.V., Flocas, H.A., 2003. Hailstorms in northern Greece: synoptic patterns and thermodynamic environment. *Theor. Appl. Climatol.* 75, 189-202.
- [32] Sioutas, M.V, Keul, A.G., 2007. Waterspouts of the Adriatic, Ionian and Aegean Sea and their meteorological environment. *Atmos. Res.* 83, 542-557.
- [33] Sioutas, M.V., Renko T., Szilagyi W., Keul, A.G., 2014. Waterspout climatology over the Central-Eastern Mediterranean, *Proceedings COMECAP: 12th INTERNATIONAL CONFERENCE of Meteorology, Climatology and Physics of the Atmosphere*, Heraklion 28 – 31 May 2014., 3, 154-158.
- [34] Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.-Y., Wang, W., Powers, J.G., 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR/TN–475. NCAR: Boulder, CO.
- [35] Spratt, S.M., Choy, B.K., 1994. Employing the WSR-88D for waterspout forecasting. *Postprints, NEXRAD Users Conference.* NWS, Norman, OK. 248-258.
- [36] Szilagyi, W., 2005. Waterspout nomogram instructions. Internal manuscript. Meteorological Service of Canada, Toronto.
- [37] Szilagyi, W., 2009. A Waterspout forecasting technique. *5th European Conference on Severe Storms.* Landshut 12 - 16 October 2009.
- [38] Telišman Prtenjak, M., Viher, M., Jurković, J., 2010. Sea/land breeze development during a summer bora event along the north-eastern Adriatic coast. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 136, 1554-1571.
- [39] Telišman Prtenjak, M., Horvat, I., Tomažić, I., Kvakić, M., Viher, M., and Grigosono, B., 2015. Impact of mesoscale meteorological processes on anomalous radar propagation conditions over the northern Adriatic area. *J. Geophys. Res.* 120, 8759–8782.